

2 - LIGANTES ASFÁLTICOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Os asfaltos, materiais aglutinantes de cor escura, são derivados do petróleo, sendo que o elemento predominante é o betume (99,5%). Betume, muitas vezes usado como sinônimo de asfalto, é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (ROBERTS *et al.*, 1998).

Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação das frações mais leves (mais voláteis) do petróleo e aflorados à superfície em épocas remotas. São exemplos sempre citados os asfaltos naturais de Trinidad e do Lago Bermudez. Atualmente, quase toda a produção de asfalto resulta da destilação de petróleo em unidades industriais (refinarias). Em obras de pavimentação, os asfaltos podem ser denominados ligantes asfálticos, cimentos asfálticos ou materiais asfálticos, sendo adotado neste trabalho o termo mais genérico ligante asfáltico, pois aos asfaltos podem ser adicionados produtos que visam melhorar suas propriedades de engenharia (modificadores).

Cerca de 32 milhões de toneladas de asfalto são produzidas anualmente nos Estados Unidos, sendo que 84% são empregados como materiais para pavimentação, 12,5% como impermeabilizantes e o restante em outros diversos tipos de aplicações (ESTAKHRI *et al.*,1992). No Brasil, são produzidos pela Petrobrás cerca de 2 milhões de toneladas de cimento asfáltico de petróleo por ano (LEITE, 1999), utilizados principalmente em pavimentação asfáltica.

Em comparação com os pavimentos de concreto de cimento Portland (pavimentos rígidos), os pavimentos flexíveis, construídos com ligante asfáltico e agregado pétreo, apresentam menor custo de construção e proporcionam um conforto muito maior aos usuários, pois não requerem a construção de juntas de dilatação. Essas têm sido as principais razões do grande emprego de ligantes asfálticos em obras de pavimentação (ZAMAN *et al.*, 1995), principalmente em misturas asfálticas usadas na camada de revestimento.

O asfalto é um material complexo, tanto do ponto de vista de composição química como de propriedades de engenharia. Apresenta um comportamento viscoso (Figura 2.1), caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica (Figura 2.2), caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura.

Somente sob condições extremas o CAP se comporta como sólido elástico (baixa temperatura e pequeno tempo de carregamento) ou como líquido viscoso (alta temperatura e grande tempo de carregamento). Portanto, a susceptibilidade à temperatura e ao tempo de carregamento de um CAP é uma variável importante no desempenho de pavimentos, devendo ser quantificada por ensaios reológicos que determinam as propriedades fundamentais dos materiais.

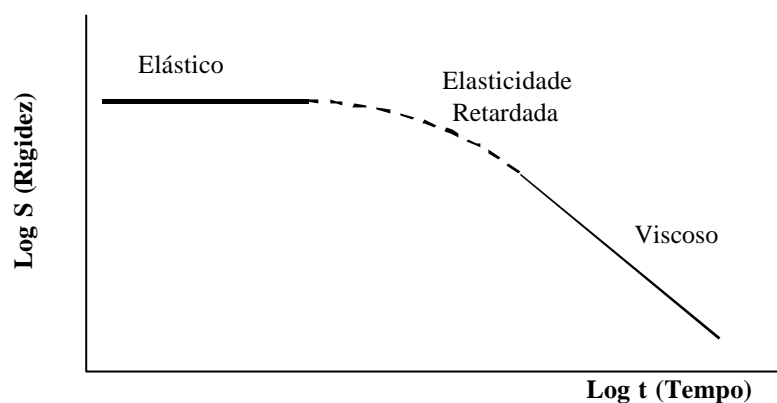


FIGURA 2.1 – Comportamento do ligante asfáltico em função do tempo de aplicação de carga (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

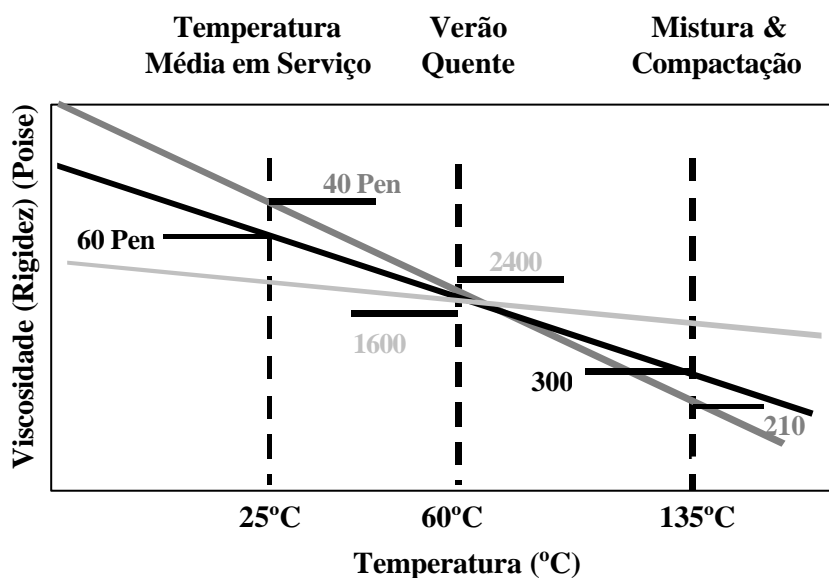


FIGURA 2.2 – Susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

Para ser utilizado em pavimentação, o asfalto, material termoplástico que é semi-sólido à temperatura ambiente, precisa ser aquecido para atingir a viscosidade adequada à mistura ($>100^{\circ}\text{C}$). Além do aquecimento, as outras alternativas para tornar o asfalto trabalhável são a diluição com solventes derivados de petróleo e o emulsionamento. De forma geral, os ligantes asfálticos são classificados, de acordo com o seu processo de produção, em:

cimento asfáltico de petróleo (CAP), asfalto diluído de petróleo (ADP) e emulsão asfáltica (PETROBRÁS, 1996).

O asfalto diluído resulta da mistura do cimento asfáltico com derivados de petróleo mais leves, que proporcionam produtos menos viscosos e podem ser aplicados a temperaturas mais baixas. Os asfaltos diluídos são classificados em função do tipo de solvente que é misturado ao CAP: cura rápida, CR (nafta), cura média, CM (querosene) e cura lenta, CL (gasóleo) (IBP, 1990; LEITE, 1999).

As emulsões asfálticas são constituídas pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, formando um produto estável que pode ser empregado em serviços de pavimentação à temperatura ambiente. De acordo com o tempo de ruptura, as emulsões são classificadas em três tipos: ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL) (IBP, 1990).

Tanto nos asfaltos diluídos como nas emulsões asfálticas, o produto que permanece, respectivamente, após a evaporação dos solventes e da água, é o cimento asfáltico. O desempenho das misturas asfálticas, portanto, é função das propriedades do cimento asfáltico. Como visto, o cimento asfáltico apresenta um comportamento termoplástico, ou seja, quando aquecido apresenta características de um líquido viscoso e à temperatura ambiente torna-se semi-sólido. Essa consistência variável pode ser medida por ensaios empíricos (penetração) ou fundamentais (viscosidade).

Geralmente, em pavimentos, o ligante asfáltico é exposto a uma grande variação de temperatura (-20 a +60°C) e de carregamento, suportando considerável deformação quando submetido a cargas durante um determinado período de tempo.

Os principais defeitos de um pavimento asfáltico são o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, as trincas por fadiga do revestimento e as trincas por contração de origem térmica.

Um ligante apresenta menor resistência à deformação permanente no início de sua vida em serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas temperaturas elevadas e por veículos trafegando a baixas velocidades (maior tempo de aplicação de carga). Por outro lado, a resistência às trincas por fadiga diminui com o envelhecimento, que aumenta a rigidez e diminui a ductilidade do ligante.

O estudo dos ligantes asfálticos apresenta um campo com evidente necessidade de pesquisas com o objetivo de desenvolver e viabilizar a utilização de novos produtos, capazes de tornar os pavimentos mais seguros, confortáveis e econômicos aos usuários, mediante redução ou retardamento do aparecimento de defeitos, particularmente as trincas por fadiga do revestimento, o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e as trincas por contração de origem térmica. Dentre as alternativas existentes destaca-se a incorporação da borracha de pneus aos ligantes asfálticos, objeto de estudo deste trabalho.

2.2 - REOLOGIA DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os materiais, de uma forma geral, apresentam um comportamento que varia de acordo com o tipo de solicitação (estática, dinâmica, longa ou curta duração), com as condições do meio ambiente (temperatura e umidade) e com as condições de confinamento. O estudo do comportamento tensão-deformação de um material, considerando-se também o tempo de aplicação do carregamento, se dá dentro da reologia.

A origem da palavra reologia data de 500 a.C., quando o filósofo grego Heráclito usou a expressão $\pi\alpha\nu\tau\alpha\xi\epsilon\iota$, "panta rhei", "all moves", "everything flows", que significa "tudo flui" (TRAXLER¹, 1961 *apud* LEITE, 1990). Algumas definições têm sido apresentadas. FERREIRA (1986) apresenta reologia como sendo a parte da física que estuda o comportamento mecânico dos materiais que não são nem sólidos nem líquidos.

Segundo BARTH (1968), a reologia do asfalto é o estudo dos modelos tensão-deformação do material em relação ao tempo. CHAMECKI² (1961) *apud* COELHO (1996) define reologia (do grego, rhéos = fluxo) como o ramo da física que trata do estudo da deformação e do fluxo (ou fluência) dos materiais quando sujeitos a um carregamento qualquer, levando-se em consideração o tempo de duração desse carregamento.

A relação entre tensão e deformação em função do tempo de carregamento e da temperatura pode ser empregada para explicar o conceito de rigidez de um cimento asfáltico. A resposta típica de um material visco-elástico submetido a um carregamento durante um determinado tempo de aplicação de carga é apresentada na Figura 2.3 (no caso, tensões e deformações de cisalhamento, τ e γ). No instante da aplicação de carga, há uma deformação elástica (γ_E), a que são somadas, durante o tempo de aplicação de carga, uma componente elástica retardada (γ_{ER}) e uma componente viscosa (γ_V). Imediatamente após o descarregamento, ocorre a recuperação da deformação elástica, sendo necessário um período de tempo para a recuperação da deformação elástica retardada. A componente viscosa constitui a deformação permanente.

¹TRAXLER, R. N. (1961) - El asfalto, su composición, propiedades y usos. Companhia Editorial Continental. México

²CHAMECKI, S. (1961) - Síntese da reologia e da sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos. Curso de Especialização de Pavimentação Rodoviária. Publicação B-10-59. Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER, 1959. reimp. 1961. Rio de Janeiro, RJ

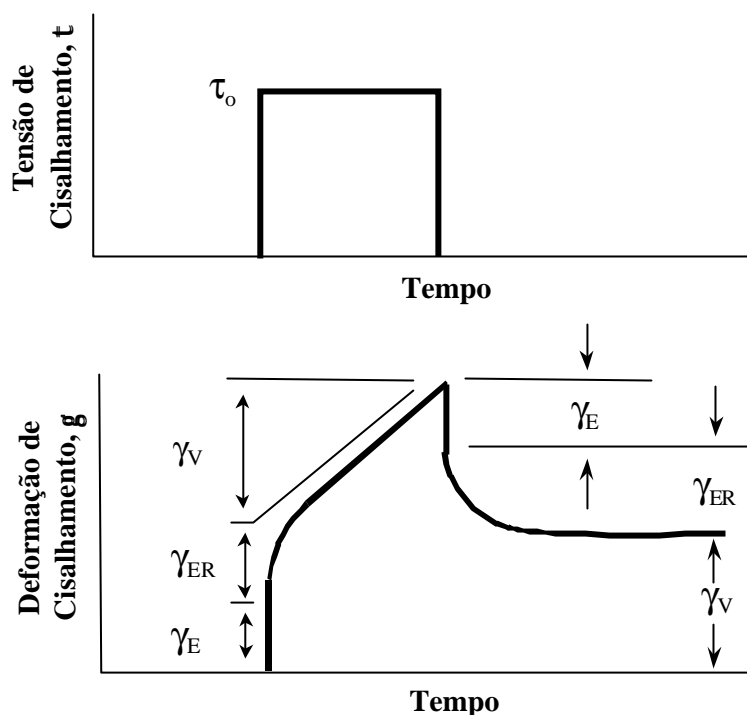


FIGURA 2.3 - Resposta visco-elástica típica de um ligante asfáltico sob carregamento, destacando-se as componentes elásticas (γ_E), elástica retardada (γ_{ER}) e viscosa (γ_V) (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)

Para a caracterização da rigidez de um ligante asfáltico, em virtude das amplitudes de temperatura e tempo de carregamento, é indicado a representação em escala logarítmica.

A Figura 2.4 apresenta curvas de ensaios de fluência (medida de deformação sob condição de carregamento constante, Figura 2.3, que permite a determinação da variação da rigidez) realizados a diferentes temperaturas (T_1 , T_2 , T_r , T_4 e T_5). Os resultados podem ser combinados em uma única curva denominada “curva mestra”, mediante translação das curvas de fluência ao longo do eixo das abscissas. Para cada curva de fluência, determinada a uma dada temperatura, tem-se um fator de conversão, $a(T)$. Os fatores de conversão podem ser plotados em função da temperatura (Figura 2.5).

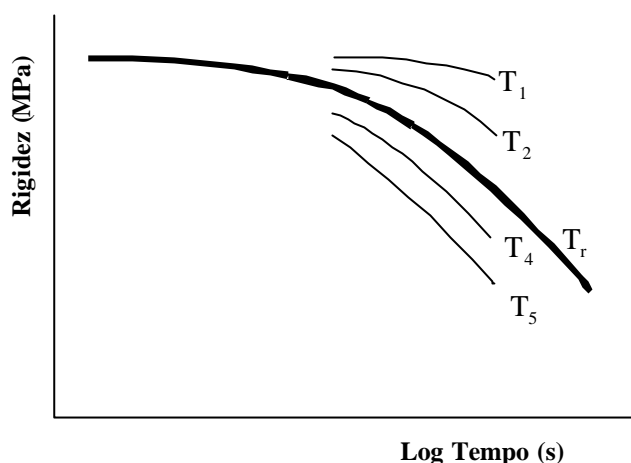


FIGURA 2.4 - Curvas de fluência realizadas a diferentes temperaturas utilizadas para determinar a curva-mestre (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)

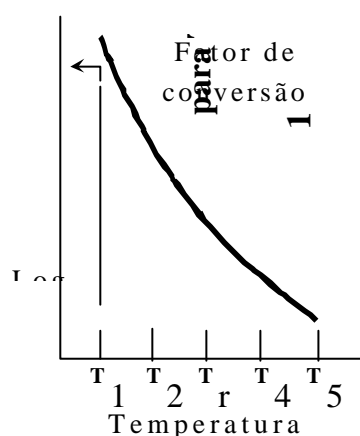


FIGURA 2.5 – Superposição tempo-temperatura (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)

Esta equivalência entre tempo e temperatura é conhecida como superposição tempo-temperatura e permite que uma curva-mestre, associada a fatores de conversão tempo-temperatura, possa caracterizar completamente o comportamento reológico (tensão, deformação, tempo e temperatura) de um ligante asfáltico. Ou seja, a influência do tempo de carregamento é representada na curva-mestre, enquanto a influência da temperatura é representada pelos fatores de conversão.

A caracterização de um ligante asfáltico geralmente é feita através de ensaios dinâmicos. Num ensaio dinâmico, a amostra de asfalto atinge uma condição estável após número limitado de ciclos. Nessa condição são determinados o pico de tensão e o pico de deformação, cuja razão é o valor absoluto do módulo de cisalhamento dinâmico ou módulo complexo, G^* .

O G^* é, portanto, a medida da resistência total do material à deformação, quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento, e consiste de dois componentes: um elástico (recuperável) e um viscoso (não-recuperável). As setas indicam na Figura 2.6, G_1^* e G_2^* , que representam os módulos complexos dos asfaltos 1 e 2.

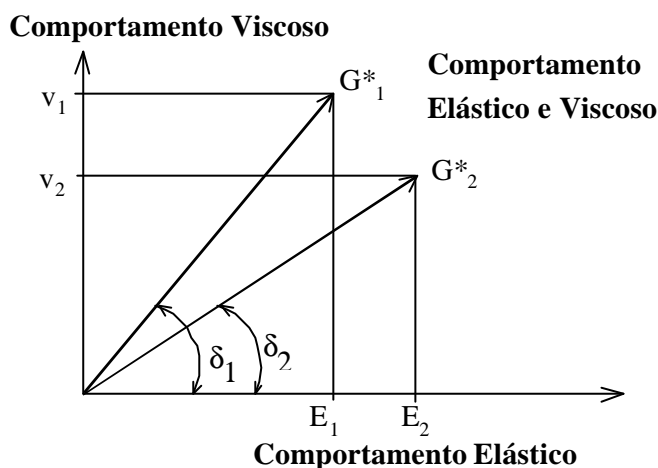


FIGURA 2.6 - Comportamento visco-elástico de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

O ângulo de fase, δ , é um indicador da quantidade de deformação recuperável e não-recuperável e corresponde ao intervalo de tempo entre a aplicação da carga (tensão aplicada) e a resposta obtida (deformação) (Figura 2.7). Para materiais puramente elásticos, o ângulo de fase será zero, enquanto que para materiais puramente viscosos, será 90° .

Os valores de G^* e δ dos asfaltos dependem da temperatura e da frequência de carregamento. A temperaturas altas, os asfaltos comportam-se como fluidos viscosos, sem nenhuma capacidade de recuperação ou restauração. Neste caso, a componente viscosa do asfalto é representada pelo eixo vertical (apenas o componente viscoso) na Figura 2.6, sem nenhum componente elástico de G^* , já que $\delta = 90^\circ$. A baixas temperaturas (menores que -20°C), os asfaltos comportam-se como sólidos elásticos e esta condição é representada pelo eixo horizontal (apenas o componente elástico) na Figura 2.6. Neste caso, não existe o componente viscoso de G^* , já que $\delta = 0^\circ$.

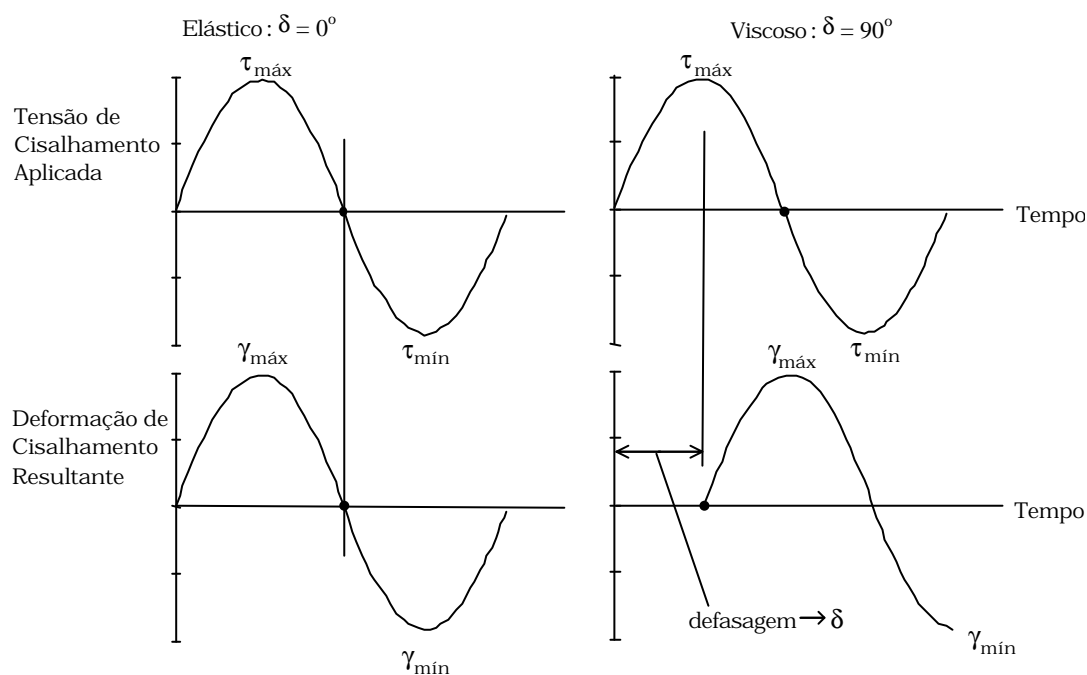


FIGURA 2.7 - Comportamento tensão-deformação de materiais asfálticos a partir de ensaios dinâmicos (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

Para a construção de uma curva-mestre, CHRISTENSEN e ANDERSON (1992), que analisaram esse aspecto dos ligantes asfálticos durante o Programa SHRP, recomendam a coleta de dados de ensaios dinâmicos realizados com diferentes temperaturas e frequências. Posteriormente, deve-se selecionar uma temperatura de referência (25°C , no caso do Programa SHRP). Os dados de

todas as outras temperaturas são então convertidos em relação ao tempo de carregamento, até que as curvas se confundam em uma única função. A conversão pode ser feita com base em funções visco-elásticas, embora no Programa SHRP a determinação dos fatores de conversão tenha sido baseada no módulo de cisalhamento dinâmico (G^* , módulo complexo), determinado através do ensaio DSR (*Dynamic Shear Rheometer*).

Uma curva-mestra típica, determinada a partir de dados de ensaio DSR (que será discutido em detalhes no capítulo 5), é apresentada na Figura 2.8. O módulo vítreo corresponde a baixas temperaturas e elevadas frequências, apresentando geralmente valores muito próximos de 1 GPa para muitos ligantes asfálticos. O índice reológico é um parâmetro definido como a diferença entre o módulo vítreo e o módulo complexo (G^*) na frequência ω_0 (frequência para a qual o ângulo de fase, δ , é igual a 45°). O índice reológico pode ser um parâmetro de susceptibilidade térmica como o índice de penetração (PI, *penetration index*) e o número penetração-viscosidade (PVN, *penetration viscosity number*) (CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992).

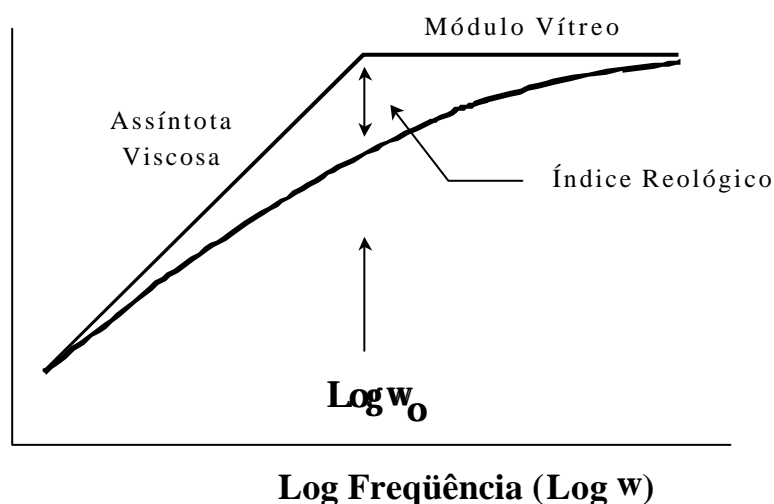


FIGURA 2.8 – Curva-mestra típica

Antes de ser colocado em serviço, um pavimento asfáltico passa pelas etapas de mistura (normalmente em usina), lançamento e compactação. Nessas etapas, o ligante asfáltico deve apresentar o comportamento de um fluido, facilitando sua mistura com os agregados minerais e aumentando a eficiência da compactação. A propriedade utilizada para caracterizar o comportamento dos ligantes asfálticos a altas temperaturas é a viscosidade, definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação de cisalhamento.

Os intervalos de viscosidade recomendados para mistura e compactação são, respectivamente, $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e $0,28 \pm 0,03$ Pa.s (Figura 2.9). São com esses intervalos que se faz a escolha das temperaturas adequadas para a mistura na usina e a compactação no campo.

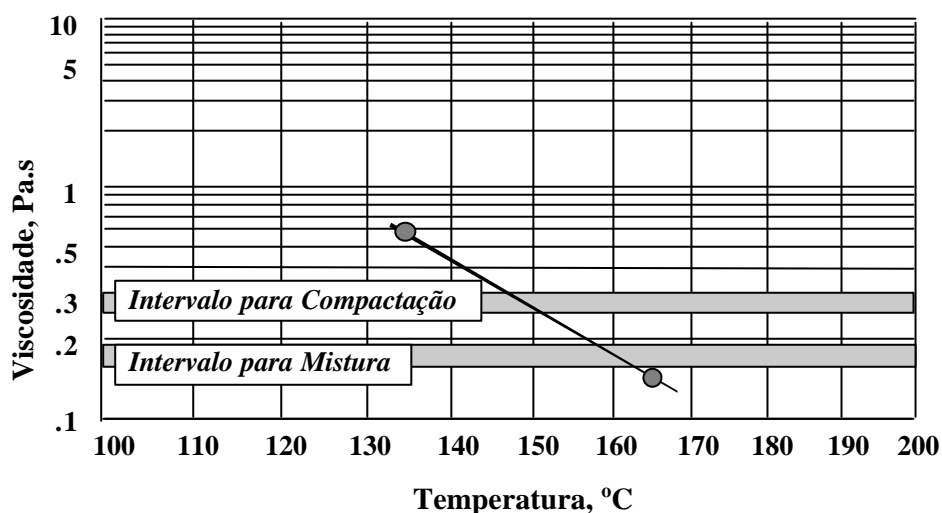


FIGURA 2.9 – Intervalos de temperatura para mistura e compactação em função da viscosidade do ligante asfáltico (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

O princípio mais usado para medir a viscosidade consiste em determinar a taxa (razão) de fluxo do material através de um tubo com seção transversal conhecida. Dessa forma, podem ser determinadas a viscosidade absoluta,

realizada a 60°C e que necessita de vácuo para o material escoar (fluir), e a viscosidade cinemática realizada a 135°C, em que o fluxo é proporcionado pela força da gravidade e por pressão da coluna de asfalto.

Para a caracterização dos ligantes asfálticos, visando o controle de qualidade nas etapas de mistura e compactação, tem sido mais utilizado o viscosímetro Brookfield (detalhado no capítulo 5) que determina a viscosidade aparente. A viscosidade do ligante é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado e misturado com o agregado. Apesar de algumas especificações recomendarem a temperatura de 135°C para a realização do ensaio, tem-se utilizado também a temperatura de 175°C quando se trabalha com ligantes modificados.

2.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A seleção de um ligante asfáltico envolve a análise das suas características reológicas, físicas e químicas. Historicamente, o parâmetro mais utilizado para classificar ligantes asfálticos é a sua consistência, que pode ser determinada através dos seguintes ensaios: penetração (ABNT/MB107); viscosidade absoluta a 60°C (ASTM D2171); viscosidade cinemática a 135°C (ASTM D2170) e ponto de amolecimento (Método Anel e Bola - ABNT/MB164).

Visando a segurança durante o manuseio dos ligantes asfálticos, as especificações recomendam limites para o ponto de fulgor, pois se um ligante asfáltico é aquecido a uma temperatura muito elevada pode ocorrer a liberação de vapores do produto, suficientes para, em mistura com ar e na presença de uma chama, provocar uma centelha. O ponto de fulgor indica a temperatura acima da qual o asfalto pode ser considerado um produto inflamável, sempre que houver uma fonte de ignição. Para determinar o ponto de fulgor pode ser usado o método de vaso aberto de Cleveland (ABNT/MB50).

Outro fator importante a ser analisado é o envelhecimento. Um cimento asfáltico é formado por moléculas orgânicas que reagem com o oxigênio do meio ambiente, ocasionando a oxidação, ou seja, a formação de uma estrutura mais dura e rígida. A oxidação aumenta com o aumento da temperatura.

Os ligantes asfálticos, quando misturados ao agregado mineral, sofrem um envelhecimento substancial em um curto período de tempo. Posteriormente, durante a vida em serviço, os pavimentos são submetidos a determinadas condições ambientais e de carregamento que resultam no envelhecimento a longo prazo. Sendo assim, é importante simular o envelhecimento dos ligantes asfálticos durante as fases de produção e de aplicação e também durante a vida em serviço, sendo para isso realizados os ensaios de filme fino em estufa (TFOT), os ensaios de rotação de filme fino em estufa (RTFOT), e os ensaios de envelhecimento em vaso de pressão (PAV), respectivamente.

Apesar de não existir material similar aos ligantes asfálticos quanto à sua aplicabilidade na construção de pavimentos, muitas vezes seu emprego requer o uso de aditivos para melhorar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, o que acaba alterando as propriedades reológicas do ligante (particularmente, borracha de pneus moída) (PETROBRÁS, 1996).

2.3.1 – Classificação por Penetração

A primeira especificação dos ligantes asfálticos desenvolvida nos Estados Unidos era baseada na aparência do asfalto natural e em ensaios químicos, usados para determinar a quantidade de betume (solúvel em dissulfeto de carbono) e de matérias orgânicas e inorgânicas presentes no asfalto. Com o crescimento da produção de misturas asfálticas, tornou-se evidente a necessidade de materiais que apresentassem uma determinada consistência para serem utilizadas na produção dessas misturas (ROBERTS *et al.*, 1998).

Em 1888, H.C. Brown inventou a máquina de penetração para determinar a consistência de um ligante asfáltico. Esse instrumento passou por algumas modificações até que, em 1910, tornou-se o principal equipamento para medir e controlar a consistência de asfaltos semi-sólidos a uma temperatura de 25°C. Entretanto, somente em 1918 o sistema de classificação por penetração (Tabela 2.1) foi introduzido pela ASTM (ROBERTS *et al.*, 1998).

A classificação por penetração é baseada, principalmente, na consistência do cimento asfáltico a uma temperatura de 25°C, considerada a temperatura média do pavimento em serviço, além de outros ensaios complementares (Tabela 2.1). Apresenta as classes 40/50, 60/70, 85/100, 120/150 e 200/300 (ASTM), sendo que no Brasil são utilizadas as classes 30/45, 50/60, 85/100 e 120/150.

TABELA 2.1 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por penetração - Regulamento Técnico 01/92 - REV.02 - DNC

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	VALORES				MÉTODOS	
		CAP 30/45	CAP 50/60	CAP 85/100	CAP 120/150	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 a 45	50 a 60	85 a 100	120 a 150	MB-107	D 5
Ductilidade a 25°C	cm	60 mín.	60 mín.	100 mín.	100 mín.		
Índice susceptibilidade térmica		-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1	(2)	
Ponto de fulgor	°C	230 mín.	235 mín.	235 mín.	220 mín.	MB-50	D 92
Solubilidade tricloroetileno	% massa	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	MB-166	D2042
Viscosidade Saybolt-Furol 135°C	s	110 mín.	110 mín.	85 mín.	70 mín.	MB-517	E 102; D2170; D2161(3)
Efeito do calor e do ar (ECA) a 163°C por 5hs:							
Penetração	(1)	50 mín.	50 mín.	47 mín.	40 mín.	MB-107	D 5
Varição em massa	%	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	MB-425	D1757

O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

Esta tabela não se aplica aos tipos de CAP produzidos pela ASFOR e RLAM.

(1) % da penetração original.

(2) Índice de susceptibilidade = $\frac{(500)(\log \text{ PEN}) + (20)(t \text{ } ^\circ\text{C}) - 1951}{120 - (50)(\log \text{ PEN}) + (t \text{ } ^\circ\text{C})}$ onde (t°C) = ponto de amolecimento

(3) Permitida determinação pelo método ASTM D2170 e posterior conversão pelo método ASTM D2161.

As principais vantagens da especificação com base na penetração são:

- a classificação é feita através de ensaios realizados a temperaturas próximas da temperatura de serviço;
- os ensaios são rápidos e necessitam de baixo custo de investimentos.

As principais desvantagens da especificação com base na penetração são:

- os ensaios são empíricos: não avaliam tensões e deformações;
- taxa de cisalhamento: alta e variável (agulha penetra mais rapidamente em asfaltos moles); incapaz de avaliar desempenho de materiais dependentes da taxa de cisalhamento (polímeros);
- penetrações similares a 25°C não refletem grandes diferenças entre asfaltos: não fornece informações sobre o desempenho a temperaturas de mistura e de compactação.

2.3.2 – Classificação por Viscosidade

Em meados da década de 60, o *Federal Highway Administration* (FHWA), a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a AASHTO e alguns departamentos de estradas de rodagem mudaram o sistema de classificação com base na penetração a 25°C para viscosidade a 60°C. Os principais objetivos eram substituir o ensaio de penetração (empírico) por um ensaio de viscosidade (científico) e medir a consistência a 60°C, que é a temperatura próxima da máxima temperatura que um pavimento atinge no verão (ROBERTS *et al.*, 1998).

No sistema de classificação pela viscosidade (Tabela 2.2) a unidade de medida é o poise, P (1P = 0,1 Pa.s). Essa classificação é baseada na viscosidade a 60°C, que apresenta a temperatura máxima obtida na superfície do pavimento, sendo dividida nas classes CAP7, CAP20 (ligantes mais utilizados) e CAP 40.

TABELA 2.2 - Especificação para cimento asfáltico de petróleo - Classificação por viscosidade - Regulamento Técnico 01/92 - REV.02 - DNC

CARACTERÍSTICAS	unidade	VALORES			MÉTODOS	
		CAP-7	CAP-20	CAP-40	ABNT	ASTM
Viscosidade a 60°C	P	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000	MB-827	D 2171
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C	S	100 mín.	120 mín.	170 mín.	MB-517	E 102
	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150		D 2170e
Viscosidade a 177°C						D 2161(1)
Ductilidade a 25°C	cm	50 mín.	20 mín.	10 mín.	MB-167	D 113
Índice susceptibilidade térmica	-1,5 a +1	-1,5 a +1	-1,5 a +1	(3)		
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	90 mín.	50 mín.	30 mín.	MB-107	D5
Ponto de fulgor	°C	220 mín.	235 mín.	235 mín.	MB-50	D 92
Solubilidade em tricloroetileno	% massa	99,5 mín.	99,5 mín.	99,5 mín.	MB-166	D 2042
Efeito do calor e do ar (ECA) a 163°C por 5hs:						
Variação em massa	%	1,0 máx.	1,0 máx.	1,0 máx.	MB-425	D 1757
Relação de viscosidade		4,0 máx.	4,0 máx.	4,0 máx.	(2)	

O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

Esta tabela não se aplica aos tipos de CAP produzidos pela ASFOR e RLAM.

(1) Permitida sua determinação pelo método ASTM D2170 e sua posterior conversão pelo método ASTM D2161.

$$(2) \text{ Relação de viscosidade} = \frac{\text{VISC. a } 60^{\circ}\text{C (poise) depois ECA}}{\text{VISC. a } 60^{\circ}\text{C (poise) antes ECA}}$$

$$(3) \text{ Índice de susceptibilidade} = \frac{(500) (\log \text{PEN}) + (20) (t \text{ } ^{\circ}\text{C}) - 1951}{120 - (50) (\log \text{PEN}) + (t \text{ } ^{\circ}\text{C})}$$

As principais vantagens da especificação com base na viscosidade são:

- propriedade fundamental;
- amplo intervalo de temperaturas;
- baseada na máxima temperatura da superfície do pavimento;
- precisão do ensaio bem estabelecida;
- controla a máxima susceptibilidade térmica;
- limita o envelhecimento (mudança de propriedades);
- informa sobre temperaturas de mistura e compactação.

As principais desvantagens da especificação com base na viscosidade são:

- é mais cara do que a classificação por penetração;
- os ensaios são mais demorados;

- não é aplicável a materiais não-Newtonianos, cujas propriedades são dependentes da taxa de cisalhamento;
- ampla faixa de propriedades para uma mesma classificação: falta de limite inferior para a susceptibilidade térmica.

Ainda durante a década de 60, o Departamento de Estradas da Califórnia desenvolveu o outro sistema de classificação, baseado na viscosidade do resíduo envelhecido (*aged residue*, AR) em um ensaio de rotação de filme fino em estufa (RTFOT): AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000, AR-16000. O valor numérico representa a viscosidade (a 60°C) do resíduo envelhecido em poises (ROBERTS *et al.*, 1991). A Figura 2.10 mostra uma comparação entre várias especificações tradicionais (relação entre rigidez e viscosidade).

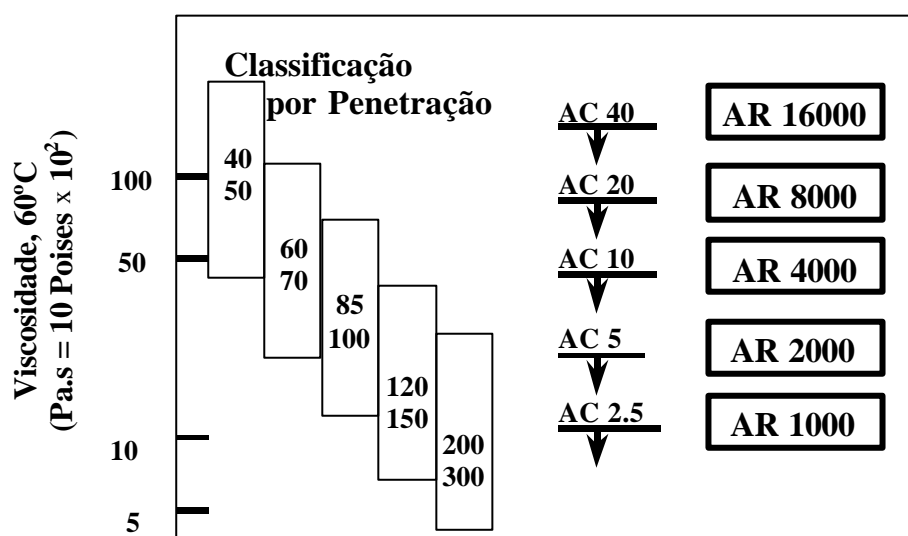


FIGURA 2.10 - Comparação entre as especificações tradicionais (adaptada de ROBERTS *et al.*, 1998)

2.3.3 – Classificação Superpave

Baseada em propriedades fundamentais, a nova especificação Superpave para materiais asfálticos seleciona o ligante em função do desempenho (PG, *Performance Grade*) sob condições climáticas da região em que será utilizado. Nesse sentido, são consideradas a maior média das máximas temperaturas do

pavimento durante 7 dias consecutivos e a mínima temperatura do mês mais frio (SHRP, 1994). A classificação Superpave é composta por dois números: o primeiro número corresponde à temperatura mais elevada do pavimento, ou seja, aquela em que os ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente devem ser realizados. O segundo número corresponde à temperatura mínima do pavimento, aquela em que os ensaios que analisam a resistência às trincas por contração de origem térmica devem ser realizados (ASPHALT INSTITUTE, 1995).

A Tabela 2.3 mostra os tipos de ligantes considerados pela especificação Superpave, onde os tipos PG 76 e 82 são necessários em climas muito quentes ou em locais de carregamento lento ou estático ou ainda tráfego excessivo de caminhões pesados. A Tabela 2.4 apresenta o sistema de classificação de ligantes do Superpave.

TABELA 2.3 - Tipos de ligantes Superpave

CLASSIFICAÇÃO A ALTA TEMPERATURA	CLASSIFICAÇÃO A BAIXA TEMPERATURA
PG 46-	34, 40, 46
PG 52-	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58-	16, 22, 28, 34, 40
PG 64-	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 70-	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 76-	10, 16, 22, 28, 34
PG 82-	10, 16, 22, 28, 34

2.4 - SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS PELO MÉTODO SUPERPAVE

A caracterização da consistência de ligantes asfálticos através dos ensaios de penetração e viscosidade apresenta limitações quando utilizada para seleção de ligantes e para a estimativa do desempenho ao longo da vida em serviço. Apesar da viscosidade ser uma propriedade fundamental, ela apenas fornece informações sobre o comportamento viscoso a alta temperatura, sem nenhuma

outra informação sobre o desempenho a média e a baixa temperatura. O ensaio de penetração, por sua vez, apenas descreve a consistência a uma temperatura intermediária, 25°C.

A seleção de um ligante pelo método Superpave começa pela determinação das temperaturas máxima e mínima do pavimento no local de projeto. O Superpave possui três métodos para auxiliar na seleção de um ligante:

- pela área geográfica: desenvolvimento de um mapa mostrando o tipo de ligante com base no clima e/ou em normas e orientações;
- pela temperatura do pavimento: necessidade de conhecer as temperaturas (máxima e mínima) do projeto do pavimento;
- pela temperatura do ar: necessidade de determinar as temperaturas do ar para convertê-las em temperaturas de projeto (do pavimento).

A temperatura máxima de projeto é determinada a 20 mm de profundidade da camada asfáltica de revestimento. Pode ser usada a seguinte equação:

$$T_{20\text{mm}} = 0,9545(T_{\text{ar}} - 0,0061\text{Lat}^2 + 0,2289\text{Lat} + 42,2) - 17,78 \quad (2.1)$$

onde:

$T_{20\text{mm}}$ = temperatura máxima do pavimento a 20 mm de profundidade, em °C;

T_{ar} = máxima média das temperaturas máximas de 7 dias consecutivos, em °C;

Lat = latitude da região de projeto, em graus.

A temperatura mínima de projeto pode ser determinada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$T_{\text{min}} = 0,859 T_{\text{ar}} + 1,7^\circ \quad (2.2)$$

onde:

T_{min} = temperatura mínima do pavimento, em °C;

T_{ar} = temperatura mínima do ar em um ano típico, em °C.

TABELA 2.4 - Classificação Superpave de Ligantes Asfálticos (D-4 – Proposal P248)

GRAU DE DESEMPENHO	PG 52					PG 58					PG 64					PG 70							
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28
Temperatura máxima de projeto de pavimento, °C ^a (média das máximas de 7 dias consecutivos)	< 52																						
Temperatura mínima de projeto de pavimento, °C ^b	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40	> 46	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40	> 10	> 16	> 22	> 28
LIGANTE ORIGINAL																							
Temperatura de Ponto de Fulgor, T48: mín, °C	230																						
Viscosidade, ASTM D4402: máx. 3 Pa.s (3000 cP), °C	135																						
Cisalhamento Dinâmico, TP5 ^c G*/senð mín. 1.00kPa, Temp. Teste @ 10 rad/s, °C	52					58					64					70							
RESÍDUO DA ESTUFA DE FILME FINO ROTATIVO (RTFOT T240) OU ESTUFA DE FILME FINO (ECA T179)																							
Perda de massa máxima, %	1,00																						
Cisalhamento Dinâmico, TP5 ^c G*/senð, mín. 2.20kPa Temp. Teste @ 10 rad/s, °C	52					58					64					70							
RESÍDUO DA ESTUFA DE ENVELHECIMENTO SOB PRESSÃO (PAV PPI)																							
Temperatura de envelhecimento PAV, °C ^d	90					100					100					100 (110)							
Cisalhamento Dinâmico, TP5 ^c G*/senð máx. 5.0MPa, Temp. Teste @ 10 rad/s, °C	25	22	19	16	13	10	7	28	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25
Endurecimento físico ^e	Anotar																						
Rigidez a Fluência, TP1 ^f ; S, máx., 300 MPa e valor-m, mín. 0,300. Temp. do Teste @ 60s	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18
Tração Direta, TP3 ^f ; deformação de ruptura, mín. 1,0%, Temp. Teste @ 1mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18

^a A temperatura do pavimento pode ser estimada a partir da temperatura do ar usando uma equação contida no programa Superpave ou pode ser fornecida por uma agência específica, ou seguindo os procedimentos descritos no PPX.

^b Este requisito pode ser mudado a critério de uma agência específica, se o fornecedor garantir que o ligante asfáltico possa ser adequadamente bombeado e misturado em temperaturas onde todos os padrões de qualidade são atendidos.

^c Para controle de qualidade de produção de asfáltos não modificados, medidas de viscosidade do cimento asfáltico original podem substituir medidas de cisalhamento dinâmico G*/senð na temperatura em que o asfalto é um fluido Newtoniano. Qualquer medida padrão de viscosidade pode ser usada, incluindo medidas com os viscosímetros capilar e rotacional (AASHTO T201 ou T202).

^d A temperatura de envelhecimento do PAV é baseada nas condições climáticas: 90°C, 100°C ou 110°C. A temperatura de envelhecimento de 100°C é usada para PG-58 (e acima), exceto em condições de clima desértico, onde utiliza-se 110°C.

^e O ensaio de rigidez a fluência (TP1) é realizado em um grupo de vigotas de asfalto de acordo com a Seção 13.1. O valor da rigidez (S) e do módulo de relaxação (m) são determinados apenas para fins de informação.

^f Se a rigidez a fluência é inferior a 300 MPa, o teste de tração direta é desnecessário. Se a rigidez estiver entre 300 e 600 MPa, é necessário determinar o valor da ruptura no teste de tração direta.

No Estado de São Paulo, por exemplo, foram obtidas informações climáticas de uma região localizada na latitude 23°32,0'S e na longitude: 46°37,0'W. A Tabela 2.5 apresenta as temperaturas mínima, máxima, mínima absoluta e máxima absoluta dessa região do Estado de São Paulo nos seguintes períodos: 1931 a 1960, 1961 a 1990, 1995, 1996, 1997, 1998 e 1999 (Anexo A).

TABELA 2.5 – Temperaturas mínima, máxima, mínima absoluta e máxima absoluta do Estado de São Paulo

TEMPERATURA (°C)	ANO						
	1931-1960	1961-1990	1995	1996	1997	1998	1999
MÍNIMA	10,0	11,5	13,0	11,5	12,0	12,0	11,5
MÁXIMA	28,0	28,5	29,0	28,5	29,0	29,5	31,5
MÍNIMA ABSOLUTA	-2,0	1,0	13,0	11,5	6,0	10,0	5,0
MÁXIMA ABSOLUTA	35,0	37,0	29,0	28,5	35,0	36,0	37,0

Fonte: Instituto Astronômico e Geofísico – USP

Utilizando-se as equações 2.1 e 2.2 foram determinados os valores da máxima temperatura do pavimento e da mínima temperatura do mês mais frio (Tabela 2.6). Com base na Tabela 2.3, pode-se verificar que no Estado de São Paulo deve ser utilizado um ligante Superpave PG 64-10, o que significa que o ligante deve apresentar propriedades físicas adequadas de -10 até 64°C.

TABELA 2.6 – Temperaturas máxima e mínima de projeto (no pavimento)

TEMPERATURA (°C)	ANO						
	1931-1960	1961-1990	1995	1996	1997	1998	1999
T _{min}	10,3	11,6	12,9	11,6	12,0	12,0	11,6
T _{20mm}	51,1	51,6	52,1	57,9	52,1	52,6	54,5
T _{min} (min. abs.)	-0,02	2,6	12,9	11,6	6,9	10,3	6,0
T _{20mm} (max. abs.)	57,8	59,7	52,1	51,6	57,8	58,8	59,7

2.5 - USO DE MODIFICADORES EM LIGANTES ASFÁLTICOS

A mistura de materiais betuminosos e polímeros, visando melhorar as características do ligante asfáltico, não é recente. A primeira patente da combinação de uma borracha natural com asfalto, a ser utilizada como impermeabilizante, foi obtida por T. Hancock em 1823. Já a primeira patente de uma mistura de material betuminoso com borracha natural para construção de estradas foi obtida por E.E. Castell em 1844 (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

Aplicações práticas de asfaltos modificados se iniciaram em 1901, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. A primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época. O principal objetivo em se combinar asfalto com polímeros é inibir a formação de trincas por fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos, além de aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente a altas temperaturas e a formação de trincas por origem térmica quando submetidos a baixas temperaturas (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

O uso de modificadores para melhorar as propriedades de um ligante em misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados visando melhorar o desempenho dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade (LING *et al.*, 1997).

BAHIA *et al.* (1998) destacam que os principais tipos de modificadores utilizados em materiais asfálticos são os polímeros (SBR, SBS e EVA) e a borracha de pneus descartados moída (Tabela 2.7). Para ROMINE *et al.* (1991), a borracha reciclada é um dos melhores modificadores utilizados em materiais asfálticos para pavimentação, ficando atrás apenas dos polímeros.

Outras evidências de que borracha de pneus usados podem melhorar algumas propriedades físicas e aumentar a vida útil do pavimento foram apresentadas por CHARANIA *et al.* (1991), por SCHNORMEIER (1980, 1983 e 1986) e por ROBERTS *et al.* (1989), que obtiveram resultados que indicam uma redução de tensões internas do ligante asfáltico a baixas temperaturas, e conseqüente aumento da resistência à formação de trincas por origem térmica, quando são adicionados o polímero SBR e a borracha de pneus.

TABELA 2.7 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar (Fonte: BAHIA *et al.*, 1998)

TIPO DE MODIFICADOR	CLASSE	DEFEITOS		
		DP	TF	TT
Polímero-Elastômero	Copolímero Estireno-Butadieno (SB)	X	X	X
	Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)	X	X	X
	Borracha Estireno-Butadieno (SBR)	X	X	X
	Borracha de Pneus	X	X	X
Polímero-Plastômero	Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	X	X	
Hidrocarboneto	Asfalto Natural	X	X	X
Fibra	Celulose	X		X
	Polipropileno	X	X	X
	Polyester	X		X
	Mineral	X	X	X

DP = Deformação Permanente; TF = Trincas por Fadiga; TT = Trincas Térmicas