

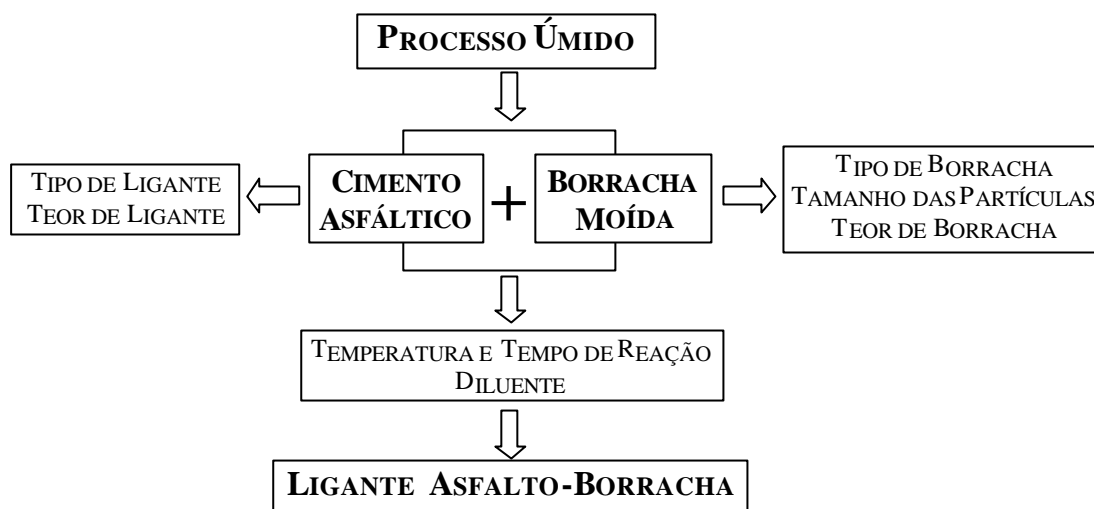
## 4 – PRODUÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA - FATORES INTERVENIENTES E ESPECIFICAÇÕES

---

### 4.1 - INTRODUÇÃO

O processo úmido consiste na incorporação da mistura da borracha de pneus moída com o ligante asfáltico antes da mistura do ligante com o agregado. O resultado é um ligante modificado que tem propriedades significativamente diferentes do ligante asfáltico original. Geralmente, tem-se a mistura de ligante asfáltico e borracha de pneus moída (5 a 25%), a uma temperatura elevada (150 a 200°C), durante um determinado período de tempo (20 a 120 minutos). Esta mistura reage e forma um composto chamado asfalto-borracha (*asphalt-rubber*), com propriedades reológicas diferentes do ligante original, podendo ser incorporados aditivos para ajustar a viscosidade da mistura. Um dos principais objetivos de se adicionar borracha de pneus moída em um ligante asfáltico é prover um ligante melhorado.

No processo úmido, a interação entre o ligante asfáltico e a borracha moída é classificada como uma reação. O grau de modificação do ligante depende de vários fatores, incluindo a granulometria (o tamanho) e a textura da borracha, a proporção de ligante asfáltico e borracha, o tempo e a temperatura de reação, a compatibilidade com a borracha, a energia mecânica durante a mistura e reação e o uso de aditivos (Figura 4.1).



**FIGURA 4.1** - Fatores que influenciam a produção do ligante asfalto-borracha

Sendo o asfalto um material de consistência semi-sólida à temperatura ambiente, é necessário torná-lo fluido para facilitar a mistura e incorporação da borracha moída. Para tanto, deve-se aquecer o asfalto até se atingir a viscosidade adequada. Além disso, a borracha, que também é aquecida previamente, deve ser misturada ao ligante durante um período de tempo suficiente para que resulte um produto uniforme, com consistência homogênea.

O tempo de reação pode ser reduzido quando se utiliza uma borracha muito fina, asfaltos menos viscosos e temperaturas altas durante a mistura. Entretanto, deve-se tomar cuidado com a temperatura, pois temperaturas elevadas podem reduzir a qualidade do ligante asfalto-borracha em razão da perda de voláteis e do envelhecimento acelerado (PAGE *et al.*, 1992).

Antes de preparar o ligante asfalto-borracha devem ser analisadas as características da borracha e do ligante asfáltico que será utilizado. Verifica-se, principalmente, a compatibilidade entre o asfalto e a borracha em termos de polaridade. Procura-se trabalhar com borrachas polares, pois no modelo

molecular dos asfaltos (ASPHALT INSTITUTE, 1995) as moléculas polares formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas e que é envolvida pelas moléculas apolares, que contribuem para as propriedades viscosas do asfalto.

Os componentes devem ser misturados com freqüente agitação para que a borracha seja incorporada ao ligante asfáltico, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação (ZAMAN *et al.*, 1995). Portanto, o equipamento misturador deve possuir um sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação de maneira constante e mais uniforme possível, além de um sistema de agitação que evite a segregação das partículas de borracha. Geralmente, o ligante asfalto-borracha deve ser utilizado em poucas horas, principalmente quando se trabalha com borracha mais grossa, pois pode ocorrer um aumento da viscosidade do ligante asfalto-borracha e, em alguns casos, a sedimentação da borracha.

A reação entre a borracha e o ligante asfáltico também é influenciada pelo tamanho das partículas de borracha, em função do efeito da superfície específica, que pode ser avaliado através dos resultados do ensaio de viscosidade do ligante asfalto-borracha com equipamento Brookfield (ASTM D2994). Por exemplo, resultados de estudo realizado por HEIZTMAN (1992a) com um ligante asfáltico modificado por 15% de borracha moída mostram que a adição de borracha de pneus descartados moída pode aumentar a viscosidade do ligante (a 135°C) em até 10 vezes.

Para definir os fatores mais importantes para o desempenho do ligante asfalto-borracha foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos desenvolvidos, basicamente em outros países, utilizando o processo úmido de mistura. Os trabalhos analisados apresentam uma variação de combinações de

fatores muito grande, sendo tais diferenças função, principalmente, de características de cada região e do tipo de aplicação.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos principais trabalhos analisados, que permitiram que se conhecesse, qualitativa e quantitativamente, a influência de muitos fatores sobre o desempenho do ligante asfalto-borracha.

Na Tabela 4.1 é dado destaque para os pesquisadores e a data de publicação do trabalho e, principalmente, para os fatores: tempo de reação, temperatura de mistura da borracha de pneus usados ao cimento asfáltico, granulometria da borracha, teor de borracha, tipo de ligante e finalidade de aplicação do asfalto-borracha (elemento da estrutura do pavimento).

Existem especificações técnicas para o ligante asfalto-borracha, com exigências de propriedades que devem ser atendidas visando sua utilização sob diferentes condições climáticas. Merecem destaque as especificações da BAKER RUBBER Inc. (Tabela 4.2) e da ASTM-D6114 (Tabela 4.3).

Pode-se observar que as duas especificações propostas são baseadas nas características climáticas. A ASTM (1997) apresenta uma especificação para três tipos de ligantes, que foram divididos de acordo com a média das temperaturas máxima e mínima. Considerando a temperatura média das máximas semanais, os limites estabelecidos foram: maior que 43°C, de 27 a 43°C e menor que 27°C. Enquanto que, segundo a temperatura média das mínimas mensais, os limites estabelecidos são: maior que -1°C, de -9 a -1°C e menor que -9°C.

**Tabela 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha**

PESQUISADOR (ano)	TEMPO (minutos)	TEMPERATURA (°C)	GRANULOMETRIA (mm)	TEOR DE BORRACHA (%)	TIPO DE LIGANTE	APLICAÇÃO
Arizona (HICKS et al., 1995)	30 a 60	175	< 2,00	20	AC-10	SAMI; SAMI; selante
BAKER e CONNOLLY (1995)		175	0,42	10, 15 e 18	AC-20 e AC-10	CAUQ, reforço
BILLITER et al. (1996)	60	175, 190 e 200	2,0; 0,42 e 0,177	5, 10 e 20	AC-10 e AC-5	CAUQ, OGFC; DGFC
BROWN et al. (1997)	35	170	19,0 - 0,075	10	AC-20	CAUQ, SAMI
CHEHOVITS e MANNING (1984)		175		15 a 30		selante
COETZEE e MONISMITH (1979)		175 a 200		20		SAMI; SAMI; selante, CAUQ, prevenir trincas, reforço
COOMARASAMY et al. (1996)		160 a 180	< 0,60	10	CAP 85/100, CAP 150/200	CAUQ, camada de rolamento de graduação aberta e de graduação densa
DALY e NEGULESCU (1997)	20 a 40	170 a 220	0,075	15; 20	AC-5, AC-20 e AC-30	
EMERY (1995)	45	175	4,8; 2,0; 0,84 e 0,177	7		selante, CAUQ, impermeabilizante
Flórida (HICKS et al., 1995)	10 10 a 15	150 a 170 150 a 175	0,177 a 0,42 0,177 a 0,42	5 (DGFC) 12 (OGFC)	AC-30 AC-30	Reabilitação; SAMI; OGFC; DGFC
HEIZTMAN (1992a)			0,177	20 a 30 (SAMI); 15 a 20 (CAUQ); 8 a 9 (OGFG)		SAMI; SAMI; selante, CAUQ
HUFF e VALLERGA (1981)		175 a 204		20±2	AR-4000	SAM, SAMI, CAUQ, OGFC; DGFC
JIMENES (1982)	60	200	0,075 a 2,4	20	AR-4000	CAUQ
KHEDAYWI et al. (1993)	30	160 a 230	0,075 a 1,2	5, 10, 15 e 20	CAP 85/100	CAUQ
KRUTZ e STROUP-GARDINER (1992)	30	175	0,075 a 2,0	16 e 17	AC-5, AC-20, AC-40	CAUQ, prevenir trincas
LEITE (1999)	120	190		20	CAP 20	
LIANG e LEE (1996)	120	175	0,075 a 12,7	10, 15 e 20	AC-5, AC-10 e AC-20	CAUQ
MADAPATI et al. (1996)			0,177	15	AC-10 e AC-20	CAUQ, DGFC
MALPASS e KHOSLA (1995)	90	175	0,177 a 4,8	11	AC-20	reduzir trincas, CAUQ

**Tabela 4.1 - Resumo de projetos de pesquisa que analisaram o ligante asfalto-borracha (continuação)**

PESQUISADOR (ano)	TEMPO (minutos)	TEMPERATURA (°C)	GRANULOMETRIA (mm)	TEOR DE BORRACHA (%)	TIPO DE LIGANTE	APLICAÇÃO
MORRIS e MCDONALD (1976)	20	190	0,42 a 0,71	25	CAP 85/100	SAM, SAMI, selante, impermeabilizante, capa selante
OLIVER (1981)	60	200 a 220	0,3 a 0,6; 0,075 a 0,15	15	CAP 85-100	selante, CAUQ
OTOO (1999)	20	150	0,177	5, 10 e 15	AC-30	
Ravendale (REESE, 1994)	45	175		18	AR-4000	SAM, SAMI, selante, CAUQ
REESE (1994)	45	190		5, 10, 15, 20 e 25	AR-4000	CAUQ
REESE (1994)	5, 10, 15, 30 e 45	190		20	AR-4000	CAUQ
ROBERTS e LYTTON (1987)	30 a 120	165 a 215	0,075 a 2,0	15 a 28	AC-10	CAUQ
ROBERTS et al. (1989)	60 a 120	190 a 215	0,30 a 0,71	15 a 26		SAM, SAMI, selante, CAUQ
RUTH et al. (1997)	5,15 e 30	135, 150, 165, 180	0,177; 0,42; 0,84	0, 6, 12, 18 e 24	AC-5 e AC-30	
SHIH et al. (1996)		190	0,177	10 a 15	AC-20 e AC-30	CAUQ
SHULER (1982)		215 a 220	0,15 a 2,4	18 a 26	CAP 85/100	SAM, SAMI, selante, CAUQ
STROUP-GARDINER et al. (1993)		185	0,15; 0,30; 0,60 e 1,2	0, 10, 15 e 20	CAP 85/100; CAP 120/200	SAM, SAMI, selante, CAUQ
TAKALLOU e SAINTON (1992)	120	180 a 200		8, 9 e 10	CAP 80/100	
TAKALLOU et al. (1997)	45	200	0,15 a 2,4	15	AR-4000	prevenir trincas, reforço, CAUQ
TROY et al. (1996)		170 a 185	0,075 a 2,4	10 e 20	AC-5, AC-10 e AC-20	CAUQ
TULELAKE (REESE, 1994)	45	175		17	AR-4000	SAM, SAMI, selante, CAUQ
VALLERGA (1981)	45	190 a 215	0,075 a 2,4	20 e 25	AC5, AC40, AR-1000, AR-8000	CAUQ
WAY (1999)	60	175	0,075 a 2,0	20	AC10 e AC20	selante, CAUQ, prevenir trincas, reforço, OGFC
WEST et al. (1998)	60	165	< 0,42	20	AC30	CAUQ
ZAMAN et al. (1995)	30	175 a 200	0,177	2,5; 5; 7,5 e 10	AC30	reduzir trincas, CAUQ

**TABELA 4.2** - Especificação para diferentes tipos de ligantes asfalto-borracha proposta por BAKER RUBBER Inc. (1988)

TIPO DE LIGANTE	ARB-1	ARB-2	ARB-3
Método de ensaio	ZONA CLIMÁTICA		
Média das máximas semanais de temperatura (°C)	> 38	26 a 38	< 26
Média das mínimas mensais de temperatura (°C)	> 0	-12 a 0	< -12
Viscosidade aparente (cP) 175°C ASTM D2994 haste 3, 12 rpm	1000 mín 4000 máx	1000 mín 4000 máx	1000 mín 4000 máx
Penetração (1/10 mm), 25°C AASHTO T49 100 g, 5 s	25 mín 75 máx	50 mín 100 máx	75 mín 150 máx
Penetração (1/10 mm), 4°C - AASHTO T49, 200g, 60s	15 mín	25 mín	40 mín
Ponto de amolecimento (°C) - ASTM D36	54 mín	49 mín	43 mín
Resiliência (%) 25°C - ASTM D3407	20 mín	10 mín	0 mín
Ductilidade (cm) 4°C - AASHTO T51 1 cm/min	5 mín	10 mín	20 mín
Ensaio com resíduo envelhecido em estufa de filme fino (AASHTO T179)			
Penetração 4°C (% original) - AASHTO T49 200g, 60s	75 mín	75 mín	75 mín
Ductilidade 4°C (% original) - AASHTO T51 1 cm/min	50 mín	50 mín	50 mín

**TABELA 4.3** - Propriedades físicas de ligantes asfalto-borracha (ASTM, 1997)

LIGANTE		TIPO I	TIPO II	TIPO III
MÉTODOS DE ENSAIO				
Viscosidade Aparente, 175°C: cP	mín	1500	1500	1500
Método Modificado ASTM D2196, Método A <sup>A,B</sup>	máx	5000	5000	5000
Penetração, 25°C, 100g, 5s: 1/10 mm (ASTM D5)	mín	25	25	50
	máx	75	75	100
Penetração, 4°C, 200g, 60s: 1/10 mm (ASTM D5)	mín	10	15	25
Ponto de Amolecimento: °C (ASTM D36)	mín	57,2	54,4	51,7
Resiliência, 25°C: % (ASTM D5329)	mín	25	20	10
Ponto de Fulgor: °C (ASTM D93)	mín	232,2	232,2	232,2
Ensaio com resíduo em estufa de filme fino (ASTM D1754) <sup>C</sup>				
Penetração, 4°C: % original (ASTM D5)	mín	75	75	75

<sup>A</sup> Pode ser utilizado um Viscosímetro Brookfield com leitura digital.

Para modelos da série LV, usar spindle 3 a 12 rpm.

Para modelos das séries RV e HA, usar spindle 3 a 20 rpm.

<sup>B</sup> Podem ser utilizados viscosímetros tipo Rion ou Haake (com Rotor No. 1) quando correlacionado com as medidas do Brookfield. De qualquer forma, o Brookfield será o “método” de referência.

<sup>C</sup> O ensaio de Resíduo RTFO (ver Método de Ensaio D 2872) pode ser substituído pelo Ensaio de Resíduo TFOT.

No Estado de São Paulo, a média das temperaturas máximas nos últimos 5 anos é 33,1°C, enquanto que a média das temperaturas mínimas nesse período é 9,1°C. Nesse caso, se for considerado a média das mínimas de temperatura, o ligante asfalto-borracha deve atender o Tipo I da ASTM (ASTM, 1997) e o tipo ARB-1 proposto por BAKER RUBBER Inc. (1988). No entanto, se for considerado a média das máximas de temperatura, o ligante asfalto-borracha deve atender o Tipo II da ASTM e o tipo ARB-2 proposto por BAKER RUBBER Inc. (1988). Como no Brasil os principais defeitos ocorrem sob temperaturas elevadas ou temperaturas médias em serviço, considera-se o Tipo II da especificação ASTM e o ARB-2 da especificação proposta por BAKER RUBBER Inc. (1988).

A especificação Superpave de ligantes asfálticos (D4 - Proposal P248) define a classe (PG) em função da temperatura do pavimento (Tabela 2.4). Estabelece valores limites para os ligantes ensaiados antes do envelhecimento (ponto de fulgor maior que 230°C, viscosidade aparente máxima de 3000 cP e cisalhamento dinâmico maior que 1,0 kPa), para os ligantes asfálticos ensaiados após o envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (perda de massa máxima de 1,0% e cisalhamento dinâmico maior que 2,2 kPa) e para os resíduos envelhecidos em vaso de pressão (cisalhamento dinâmico menor que 5000 kPa, rigidez à fluência maior que 300 MPa e tração direta com deformação de ruptura mínima de 1,0%).

## **4.2 – MATERIAIS**

Os materiais utilizados nas misturas são borracha de pneus descartados moída e cimento asfáltico de petróleo (CAP), podendo ser adicionado diluente para reduzir a viscosidade da mistura. Apresentam-se, a seguir, os principais fatores que condicionam o desempenho de ligantes asfalto-borracha.

#### **4.2.1 – BORRACHA**

##### **a) Tipo de borracha**

A borracha utilizada no ligante asfalto-borracha pode ser proveniente de pneus de automóveis ou caminhões, podendo ser utilizada uma mistura de borracha de pneus de automóveis e caminhões.

Os pneus de automóveis são compostos por uma quantidade maior de borracha sintética, enquanto os pneus de caminhões são compostos por uma quantidade maior de borracha natural. A borracha natural fornece as propriedades elásticas, enquanto a borracha sintética proporciona a estabilidade térmica (RUTH *et al.*, 1997).

A composição química da borracha depende do processo de produção e influencia a elasticidade do asfalto-borracha e a estabilidade do produto (ROBERTS e LYTTON, 1987). Segundo EPPS (1994), o tipo de borracha, função da porcentagem de borracha natural e sintética, pode influenciar a viscosidade a 60°C e a ductilidade do ligante asfalto-borracha.

Apesar de alguns trabalhos publicados mencionarem a necessidade de uma porcentagem mínima de borracha natural, da ordem de 30%, vários estudos foram desenvolvidos com uma quantidade inferior de borracha natural (Tabela 4.4).

Com base em pesquisas bibliográficas e em contato com a engenheira Leni Leite, do CENPES (Petrobrás), verificou-se a inexistência de produtores de borracha de pneus moída em escala comercial. Porém, há no Brasil uma empresa que produz borracha de pneus moída com excelentes características técnicas (LEITE, 1999) e que se dispôs a fornecer, gratuitamente, a quantidade de borracha de pneus moída necessária à pesquisa.

**TABELA 4.4** – Composição dos pneus estudada por TAKALLOU *et al.* (1986)

COMPONENTES	%
Hidrocarbonetos (20% de borracha natural e 80% de borracha sintética)	45
Negro de fumo	30
Solúvel em acetona (plastificante)	15
Fibra (sílica?)	10

Durante a etapa inicial da pesquisa, foram feitos contatos com fornecedores dos Estados Unidos visando a aquisição de borracha de pneus moída com características adequadas à produção do ligante asfalto-borracha. A Empresa Rouse Rubber forneceu o orçamento de US\$ 500,00/ton (sem contar o transporte), exigindo a aquisição mínima de uma tonelada.

Dadas as características técnicas comprovadas (pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e por LEITE, 1999), optou-se por trabalhar exclusivamente com a borracha produzida no Brasil. Portanto, a borracha utilizada neste trabalho foi fornecida pela Relastomer Tecnologia e Participações S.A., que tem como característica básica recuperar borrachas vulcanizadas e semi-vulcanizadas utilizando baixas temperaturas (máximo de 80°C), o que permite executar este processamento na fase líquida (fazendo a separação da borracha e do aço por filtragem e magnetismo), usando um catalisador heterogêneo. Segundo o fabricante, o produto gerado (borracha em pó) apresenta uma alta homogeneidade, mantendo cerca de 75% das características físicas da composição original.

A borracha Relastomer é composta por moléculas polares, que no modelo molecular dos asfaltos (ASPHALT INSTITUTE, 1995) formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas e que são envolvidas pelas moléculas apolares, que contribuem para as propriedades viscosas. A caracterização

química da borracha Relastomer, realizada através de uma análise gravimétrica térmica (Tabela 4.5), confirma a inferência feita a partir da análise de polaridade molecular.

**TABELA 4.5** - Propriedades químicas da borracha Relastomer (LEITE, 1999)

COMPONENTES	ANÁLISE GRAVIMÉTRICA TÉRMICA (%)
Plastificante	5,2
Elastômeros	58,8
Negro de fumo	28,8
Cargas inorgânicas	5,7

#### **b) Tamanho das partículas de borracha**

O tamanho das partículas de borracha pode variar com o seu processo de produção (tipo de equipamento, temperatura etc.). Existem dois processos para moer a borracha: trituração à temperatura ambiente (processo mecânico) e processo criogênico.

A trituração à temperatura ambiente consiste em uma série de trituradores, peneiras, correias transportadoras e tambores magnéticos para remoção do aço, se necessário, e é dividida em três tipos: *crackermill*, *granulator*, *micro-mill*. A diferença entre os métodos que utilizam o processo mecânico está no tamanho das partículas: *crackermill* produz partículas que variam de 4,8 até 0,42 mm (formado por partículas irregulares com maior área superficial); *granulator* produz partículas que variam de 2,0 até 9,5 mm (constituído de partículas de forma cúbica, uniformes e com pequena área superficial, denominado de borracha granulada); *micro-mill* produz partículas finas que variam de 0,42 a 0,075 mm.

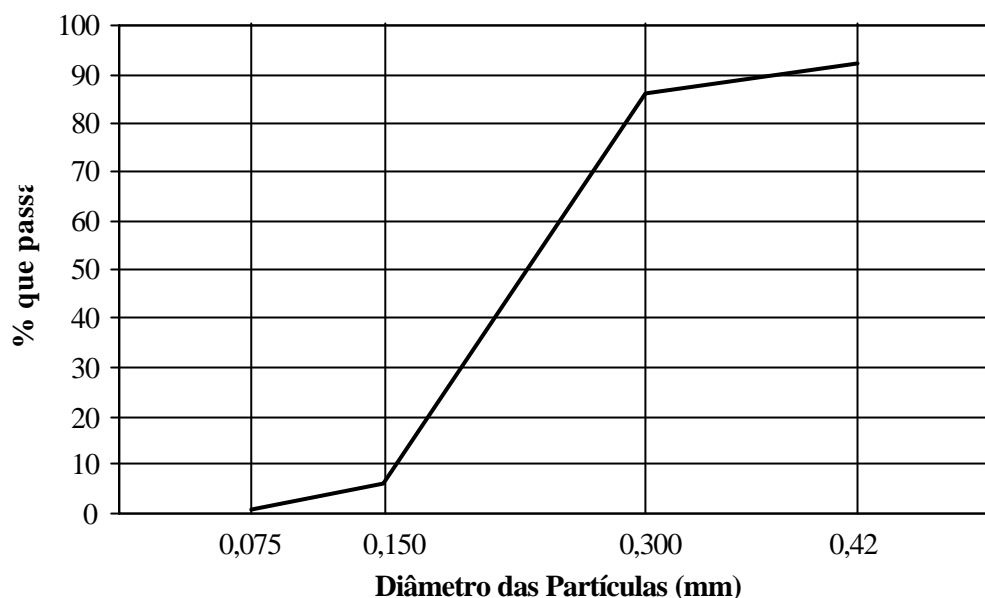
O processo criogênico consiste na submersão da borracha de pneus em nitrogênio líquido (-90°C a -200°C), pois abaixo de -60°C a borracha é muito

frágil e pode ser facilmente triturada em um moinho de impacto (“moinho de martelo”) (RUTH *et al.*, 1997).

Segundo MORRIS e McDONALD (1976), partículas de borracha que passam na peneira #25 e ficam retidas na peneira #40, quando misturadas com o ligante asfáltico a uma temperatura de 190°C, durante 20 minutos, aumentam em aproximadamente duas vezes seu volume original. Na mistura, as partículas de borracha tornam-se mais macias e mais elásticas. Isso ocorre como resultado das reações químicas e físicas entre as resinas do asfalto e da borracha. O grau dessa reação pode ser modificado através da variação da composição do asfalto e também do tamanho e da quantidade de borracha moída. Uma vantagem do uso de borracha fina é que a mistura asfalto-borracha resultante é mais homogênea e apresenta melhores resultados em ensaios de viscosidade e outros ensaios de controle de qualidade (PAGE *et al.*, 1992).

Resultados obtidos por OLIVER (1981) ressaltam a importância da superfície específica da borracha moída nas propriedades elásticas do asfalto-borracha, mostrando que além da granulometria também tem muita importância a forma das partículas.

A borracha utilizada neste trabalho, fornecida pela empresa Relastomer, é composta de partículas que passam na peneira #40 e ficam retidas na peneira #200 (0,42 a 0,075 mm, Figura 4.2).



**FIGURA 4.2** – Curva granulométrica da borracha fornecida pela Relastomer

### c) 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, podendo variar de 5 a 25%. O teor ótimo, em camadas de revestimento de CAUQ densas, é de cerca de 5% de borracha passada na peneira #50 (0,177 mm), enquanto que em camadas de revestimento com granulometria aberta o valor mais citado na literatura técnica é de 12% de borracha passada na peneira #40 (0,42 mm). Em aplicações de ligante asfalto-borracha entre o pavimento existente e a camada de reforço (SAMI), podem ser adotados teores mais elevados, de até 20% de borracha passada na peneira #10 (2,00 mm), a uma taxa de cerca de 2,7 l/m<sup>2</sup> (PAGE *et al.*, 1992). Em ligantes asfalto-borracha para selagem de trincas podem ser utilizados até 25% de borracha de pneus moída (McDONALD, 1976). HEIZTMAN (1992b) mostra como o teor de borracha influencia algumas das propriedades do ligante asfáltico de forma significativa (Tabela 4.6).

**Tabela 4.6** - Efeito do teor de borracha moída nas propriedades do ligante asfalto-borracha (HEIZTMAN, 1992b)

PROPRIEDADES DO LIGANTE	TEOR DE BORRACHA (%)						
	0	6	9	12	15	18	21
VISCOSIDADE A 175°C (cP)	60	550	800	900	1500	2500	6000
PENETRAÇÃO A 25°C (1/10 mm)	48	40	43	44	40	30	27
PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)	50	52	58	60	61	63	72

#### 4.2.2 – LIGANTE ASFÁLTICO

Particularmente, no Estado de São Paulo, o CAP 20 é o mais utilizado. A especificação Superpave para ligantes seleciona o tipo de ligante em função do clima da região em que será utilizado o material. No Estado de São Paulo o ligante Superpave que deve ser utilizado, em função do clima, é um PG 64-10, mas dependendo do tráfego pode passar a requerer PG 70-10 ou PG 76-10. Neste trabalho será considerado apenas a influência do clima. Portanto, com o CAP selecionado serão produzidos ligantes asfalto-borracha que deverão atender aos requisitos da especificação Superpave para um PG 64-10.

#### 4.2.3 - DILUENTE

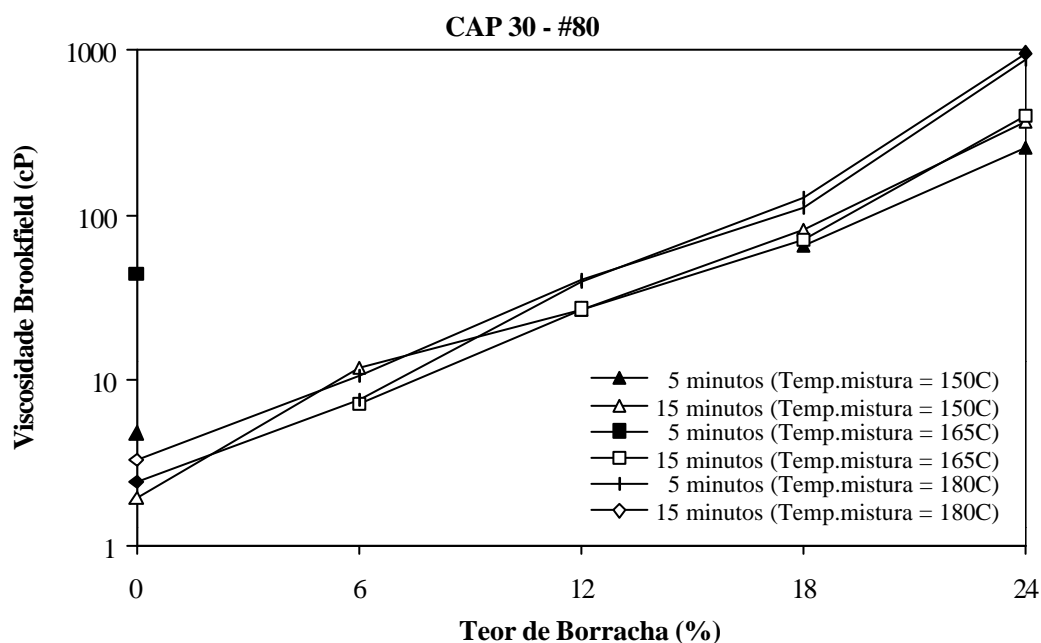
Dependendo do tipo de ligante selecionado, do tamanho e do teor de borracha pode haver a necessidade da adição de um diluente para facilitar a mistura entre os componentes.

O diluente também reduz, temporariamente, a viscosidade do ligante asfalto-borracha, facilitando a aplicação. MORRIS e McDONALD (1976) observaram que após cerca de duas horas, a viscosidade do ligante volta a seu valor original, mas o asfalto-borracha obtido é menos susceptível à temperatura do que o ligante original.

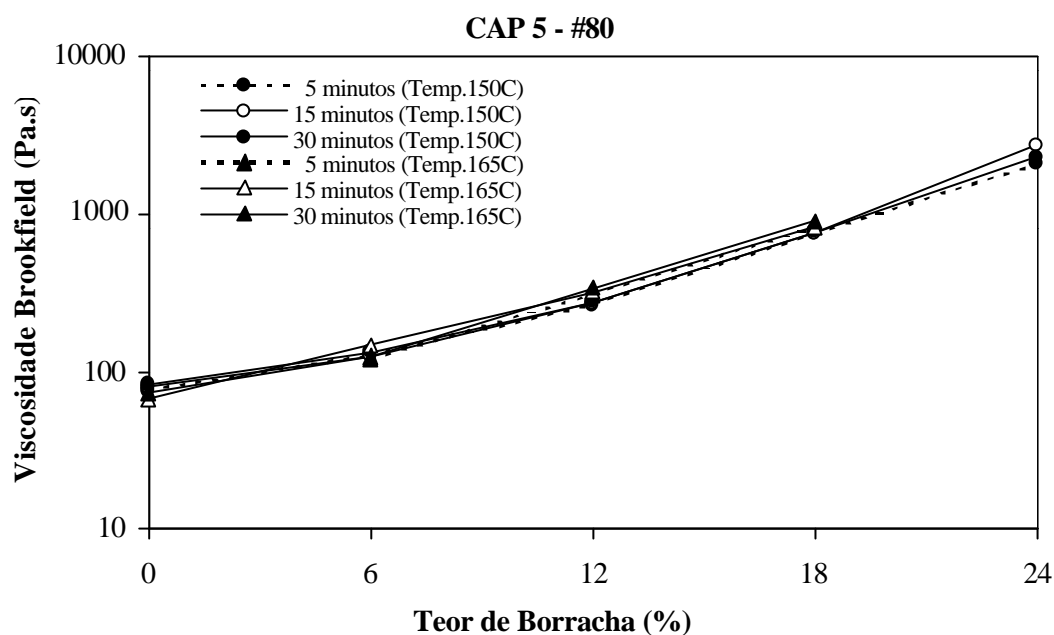
O teor de ligante sofre redução em função do uso de diluente de 10 a 25%. TAKALLOU e SAINTON (1992), por outro lado, relatam que uma grande quantidade de diluente (maior que 6%) pode reduzir o ponto de amolecimento, aumentar a penetração, aumentar a ductilidade e reduzir a resistência.

### 4.3 - TEMPERATURA E TEMPO DE REAÇÃO

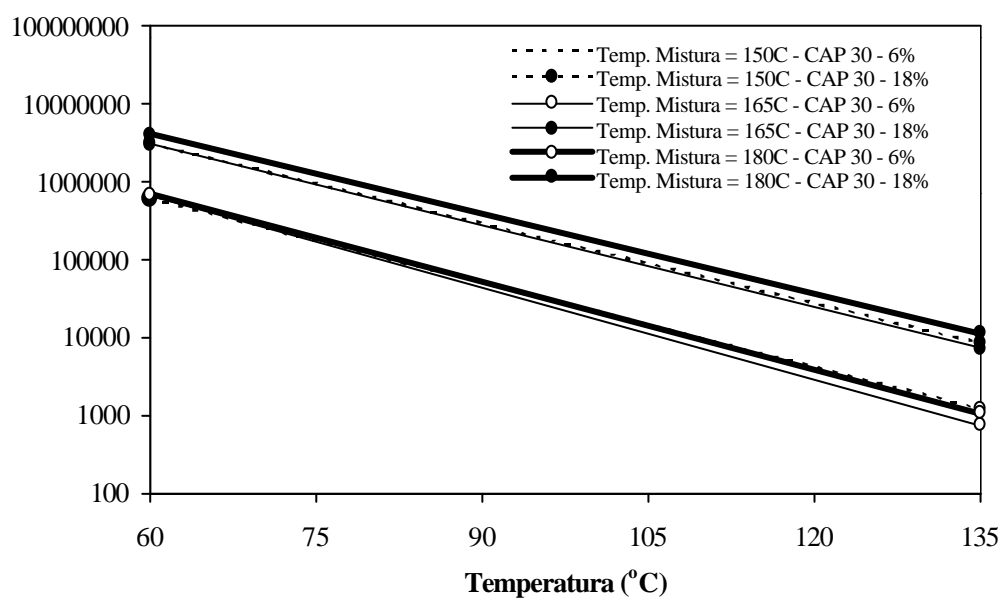
O aquecimento do ligante visa a obtenção da viscosidade adequada, de forma a facilitar a mistura e incorporação da borracha ao ligante asfáltico. O tempo de reação, por sua vez, é função do teor e granulometria da borracha, do tipo de cimento asfáltico e da temperatura de mistura. Entretanto, deve-se tomar cuidado com a temperatura da mistura, pois uma temperatura muito elevada irá reduzir a qualidade do ligante asfalto-borracha em razão da perda de voláteis e envelhecimento acelerado (PAGE *et al.*, 1992). Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, que ilustram os resultados obtidos por RUTH *et al.* (1997), pode-se verificar que o tempo de reação exerce menor influência que a temperatura de mistura na viscosidade do ligante asfalto-borracha.



**FIGURA 4.3** – Efeito do tempo de mistura na viscosidade do ligante asfalto-borracha



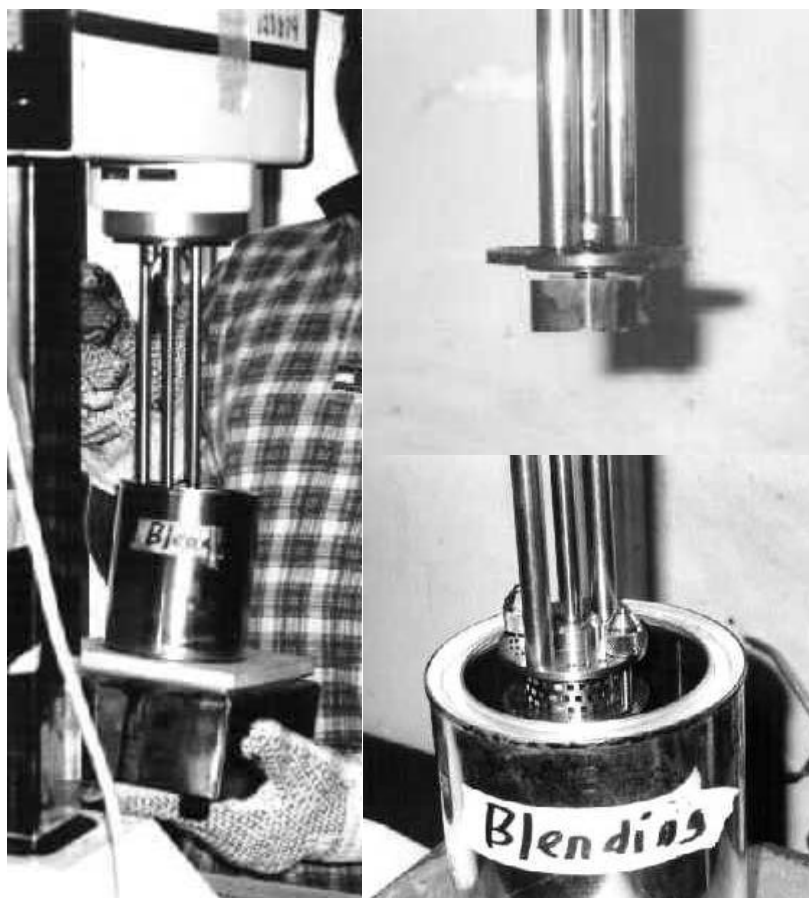
**FIGURA 4.4** – Efeito do tempo de reação na viscosidade do ligante asfalto-borracha (RUTH *et al.*, 1997)



**FIGURA 4.5** - Viscosidade do ligante asfalto-borracha: efeito preponderante do teor de borracha em relação à temperatura da mistura (RUTH *et al.*, 1997)

#### 4.4 – EQUIPAMENTO

O tipo de equipamento utilizado no preparo do ligante asfalto-borracha pode influenciar a sua homogeneidade. O equipamento deve conter um recipiente com controle de temperatura e um agitador mecânico. Os agitadores mais utilizados (RUTH et al., 1997) atingem rotação de até 4500 rpm e têm hélice cisalhante (Figura 4.6). O equipamento utilizado para preparação de amostras no Laboratório de Asfalto do CENPES (Petrobrás, RJ) é ilustrado na Figura 4.7. O agitador é de alto cisalhamento, sendo que na preparação de misturas asfalto-borracha atinge rotação de até 4000 rpm.



**FIGURA 4.6** – Equipamento utilizado na preparação de ligante asfalto-borracha



**FIGURA 4.7** – Equipamento utilizado na preparação de misturas asfalto-borracha no Laboratório de Asfalto do Cenpes

#### **4.5 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ASFALTO-BORRACHA**

As amostras utilizadas para avaliação das propriedades do asfalto-borracha foram produzidas no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Descreve-se, a seguir, os procedimentos adotados e, principalmente, as adaptações que tiveram que ser realizadas para execução desse serviço não convencional.

Como o Laboratório não possuía um equipamento adequado para a produção do ligante asfalto-borracha, foi necessário comprar um recipiente com

aquecedor e controle de temperatura e um misturador. O recipiente para colocar a mistura foi encontrado em um catálogo de artigos importados e consiste de uma panela elétrica de cerâmica com controle de temperatura até 200°C.

O melhor misturador encontrado, produzido no Brasil e com preço acessível, consiste de um agitador mecânico indicado para produtos viscosos, marca FISATOM (modelo 722), com potência de 255 W, 230 V, 60 Hz, com controle de rotação variando de 530 a 2000 rpm, haste de 600 mm de comprimento e hélice tipo naval com 80 mm de diâmetro. A Figura 4.8 ilustra o conjunto (panela + agitador) utilizado na preparação dos ligantes asfalto-borracha.



**FIGURA 4.8** - Agitador mecânico e panela elétrica utilizados na preparação dos ligantes asfalto-borracha no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP

Antes de preparar as amostras de asfalto-borracha foi preciso peneirar a borracha, separando de acordo com os intervalos granulométricos selecionados (#40 a #50 e #50 a #100, ou seja, de 0,42 a 0,30 mm e de 0,30 a 0,15 mm). Para cada amostra foram usados 2000 g de CAP 20, que permaneceram em estufa, a uma temperatura de 150°C, durante cerca de 12 horas. A borracha moída na quantidade a ser incorporada também foi mantida em estufa, a uma temperatura máxima de 50°C, durante uma hora antes do início da mistura.

O CAP 20, a 150°C, era colocado em um recipiente de cerâmica, que era encaixado dentro da panela elétrica. Apesar do termostato indicar 200°C, verificou-se que a temperatura máxima atingida pela panela era de 185°C e que a máxima temperatura alcançada pelo CAP dentro da panela era de 170°C. Controlava-se a temperatura a cada 30 minutos, sendo que levava cerca de 6 horas, em média, para o CAP atingir a temperatura de 170°C.

Após o CAP atingir a temperatura máxima, adicionava-se a borracha aquecida e iniciava-se o processo de mistura. Inicialmente, o misturador era mantido a uma velocidade baixa (500 rpm) por 2 minutos, até que não mais ocorressem respingos da mistura. Em seguida, aumentava-se a velocidade até atingir a máxima rotação (cerca de 2000 rpm), mantendo-se esse valor até o final da mistura (30 minutos).

Pequenas alterações foram feitas ao longo do preparo das misturas de asfalto-borracha. Para diminuir o tempo gasto para o CAP atingir a temperatura desejada, optou-se por colocar o CAP direto no recipiente de cerâmica e aquecê-lo, em estufa, até a temperatura de mistura com a borracha. Após cerca de 2 horas, o recipiente de cerâmica era colocado dentro da panela e mantido à temperatura de mistura, pronto para receber a borracha aquecida (50°C). Após o preparo do ligante asfalto-borracha, o material era transferido imediatamente para o recipiente de armazenamento (Figura 4.9).



**FIGURA 4.9** – Recipiente utilizado para armazenar o ligante asfalto-borracha