

Misturas asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem

Conteudista:

Letícia Alberto Borges Madureira

Brasília, fevereiro de 2023.

Misturas asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem

Módulo 1

Conceitos Gerais

Conforme estabelece O Art. 11 da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 03/DNIT SEDE, DE 1º DE ABRIL DE 2022, o servidor que optar por receber a GECC relativa à elaboração de material didático cede, tacitamente e em caráter irrevogável, a titularidade dos direitos patrimoniais relativos aos materiais produzidos em decorrência dessa percepção. Desta forma, tendo em vista o contido no Processo nº 50600.007878/2022-07, o DNIT poderá revisar o material cedido, adaptá-lo e utilizá-lo livremente em outros eventos que venha a promover, bem como o ceder a outros órgãos e entidades federais

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado da Produção de Asfalto (3 estágios de destilação).....	4
Figura 2 - Classificação SARA da estrutura por cromatografia	6
Figura 3 - Representação esquemática dos componentes dos asfaltos	7
Figura 4 - Modelo de Micelas de Yen	7
Figura 5 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração	9
Figura 6 - Ensaio de penetração.....	11
Figura 7 - Ensaio do Ponto de Amolecimento	12
Figura 8 - Viscosímetro Saybolt.....	15
Figura 9 - Gráfico da Curva x Temperatura	16
Figura 10 - Ensaio de determinação de viscosidade Brookfield.....	17
Figura 11 - Diferentes <i>spindles</i> utilizados no Viscosímetro Brookfield.....	18
Figura 12 - Ensaio de ductilidade	20
Figura 13 - Modelos de equipamentos para ensaio do Ponto de Fulgor.....	21
Figura 14 - Estufa de filme rotativo ou película delgada rotacional (RTFOT)	23
Figura 15 - Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo durante vários anos de serviço	23
Figura 16 - Ensaio de solubilidade.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites estabelecidos para penetração, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	11
Tabela 2 - Limites estabelecidos para ponto de amolecimento, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	12
Tabela 3 - Limites estabelecidos para índice de suscetibilidade térmica, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	13
Tabela 4- Índice de suscetibilidade térmica.....	14
Tabela 5 - Limites estabelecidos para Viscosidade Saybolt-Furol, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	16
Tabela 6 - Limites estabelecidos para Viscosidade Brookfield, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	19
Tabela 7 - Limites estabelecidos para ductilidade, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	20
Tabela 8 - Limites estabelecidos para Ponto de Fulgor, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	21
Tabela 9 - Limites estabelecidos após RTFOT, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	24
Tabela 10 - Limites estabelecidos conforme NORMA DNIT 095/2006 EM	25

SUMÁRIO

1.	APRESENTAÇÃO	1
2.	TERMOS TÉCNICOS	2
3.	IMPORTÂNCIA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS	2
4.	ORIGEM E PRODUÇÃO DE ASFALTO	3
5.	CARACTERÍSTICAS, ESTRUTURA E COMPORTAMENTO DO ASFALTO	5
6.	ESPECIFICAÇÕES BRASILEIRAS	8
7.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	10
7.1	DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO – NORMA DNIT 155/2010-ME.....	10
7.2	DETERMINAÇÃO DO PONTO DE AMOLECIMENTO - MÉTODO DO ANEL E BOLA – NORMA DNIT 131/2010-ME	11
7.3	ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA - IST (NORMA DNIT 095/2006 EM)	13
7.4	DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL À ALTA TEMPERATURA - MÉTODO DA PELÍCULA DELGADA (ABNT-MB 517) (NORMA DNER-ME 004/94)	14
7.5	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE EM TEMPERATURAS ELEVADAS USANDO UM VISCOSÍMETRO ROTACIONAL (ABNT NBR 15184)	17
7.6	DETERMINAÇÃO DE DUCTILIDADE (DNER-ME 163/98)	19
7.7	DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE FULGOR E DE COMBUSTÃO (DNER-ME 148/94)	20
7.8	DETERMINAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO (RTFOT) – ASTM D 2872	22
7.9	DETERMINAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM TRICLOROETILENO (ABNT NBR 14855)	24
8.	REFERÊNCIAS	25

1. APRESENTAÇÃO

O desenvolvimento de cursos autoinstrucionais pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, disponibilizados de maneira assíncrona, sem o acompanhamento de um tutor, atende ao Plano Educacional proposto para o ano de 2022. Desta forma, o participante acessa os materiais e conteúdos disponíveis de acordo com seu ritmo e com sua disponibilidade de tempo, atendendo ao prazo estipulado para conclusão do curso e conclusão das avaliações propostas.

Assim, o Curso de Misturas Asfálticas - Conceituação, Materiais e Dosagem tem o objetivo de promover a independência do aluno, desenvolvendo temáticas de maneira simples e objetiva, possibilitando que o domínio dos conceitos básicos sobre o assunto o torne apto à realização de cursos de aperfeiçoamento (síncronos e/ou presenciais).

Ao concluir o curso o aluno terá tido a oportunidade de conhecer melhor a teoria básica envolvida no processo de escolha de ligantes asfálticos, manipulação e dosagem das misturas asfálticas pelo método Marshall e Superpave.

2. TERMOS TÉCNICOS

Antes de iniciar o curso, é importante conhecermos alguns conceitos importantes:

Aglomerante	Ligante, aglutinante, <i>Binder</i>
Aglutinante	Material ativo utilizado para ligar componentes de uma mistura
Asfalto	Família de materiais com diversas aplicações, extraído do petróleo ou encontrado na natureza. (DNIT) Material aglutinante de consistência variável de cor pardo-escura ou negra, uma mistura de hidrocarbonetos derivados de petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume.
Betume	Outro nome para designar o asfalto. Mistura de hidrocarbonetos pesados obtidos em estado natural ou por diferentes processos, de consistência variável, com poder aglutinante e impermeabilizante, sendo completamente solúvel em CS ₂ .
Ligante	Material que tem a propriedade de aglutinar partículas sólidas para formar uma massa coesa.
Ligante betuminoso (asfáltico)	Ligante que contém Betume (asfalto).
Ligante simples	Ligante sem adição de outro produto a não ser materiais em porcentagem pequena, destinados a regular o início da pega ou a alterar a progressão da resistência. Ex.: Gesso, cal, cimento Portland.

3. IMPORTÂNCIA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

O asfalto é um material de grande valia para a construção. É um dos mais antigos e o mais utilizado pelo homem, podendo ser considerado um dos mais versáteis produtos da natureza (IA, 1989 versão em português, 2001).

Os registros mais antigos são de 3000 a.C., quando ele era usado para conter vazamentos de águas em reservatórios, já passando pouco depois a pavimentar estradas no Oriente Médio. No início era produzido a partir de piche retirado de lagos pastosos. Somente a partir de 1909 iniciou-se o emprego de asfalto

derivado do petróleo. No Brasil, a primeira rodovia asfaltada do país foi a Rio-Petrópolis, em 1928, durante o governo Washington Luís.

Seu uso atual vai desde a agricultura, passando pelas edificações, ferrovias, é utilizado na hidráulica e no controle de erosões, assim como na indústria, na recreação e, principalmente, na pavimentação de estradas e rodovias. Noventa e cinco por cento (95%) dos 65.568 km das rodovias federais brasileiras são pavimentadas com asfalto.

O uso é difundido porque, entre outras características, permite flexibilidade controlável, é impermeabilizante, é durável, é resistente às intempéries, e pode ser utilizado em diversas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos, o que favorece o seu uso em todas as condições geológicas e geotécnicas.

4. ORIGEM E PRODUÇÃO DE ASFALTO

Na antiguidade, o asfalto foi utilizado como argamassa nas edificações e blocos de pavimento, calafetagem de navios e em várias aplicações de impermeabilização.

Os povos da mesopotâmia utilizavam o asfalto na formulação de tintas e vernizes, argamassas impermeabilizantes para construção e até como medicamento (ABEDA, 2010). Estes primeiros asfaltos ocorriam na natureza e eram prontamente utilizáveis. Esse asfalto mole, hoje conhecido como asfalto natural, pode ser encontrado em depósitos da Ilha Trinidad, do Lago Bermudez, na Venezuela, e em extensas ocorrências de “areias alcatroadas” no Oeste do Canadá. Também aparecem encrustados em poros de rochas, denominadas rochas asfálticas (gilsonita e asfaltita).

A descoberta do asfalto refinado do óleo cru do petróleo no começo do século XX, associado à indústria automobilística em expansão, promoveu a expansão da indústria petroleira e, conseqüentemente, da pavimentação rodoviária.

O asfalto é resultante do beneficiamento do petróleo. Quase todo o asfalto em uso atualmente é proveniente do processamento do petróleo bruto ou cru (crude). A composição dos petróleos sofre variação, dependendo da origem, do tipo de

petróleo e do seu processo de produção. Cada petróleo tem diferentes quantidades de resíduos de cimentos asfálticos (CAP) e outras frações destiláveis.

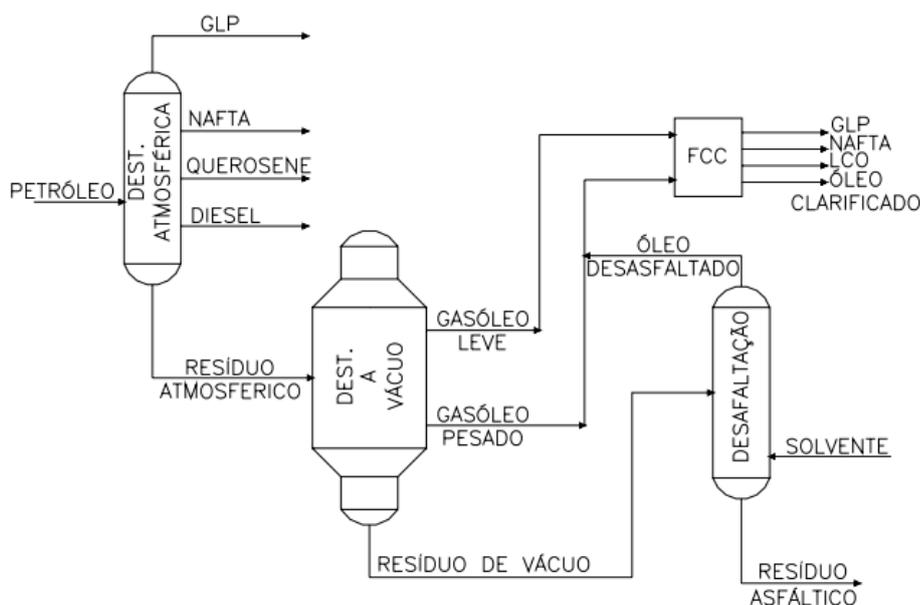
No mundo são encontrados mais de 1500 tipos de petróleo. Uma pequena parte é apropriada para a produção de asfaltos, que se distinguem por uma maior ou menor presença de asfalto em sua composição. Os melhores petróleos para a produção de asfalto encontrados são os venezuelanos (Boscan e Bachaquero).

O beneficiamento, ou refino, pode ocorrer em uma, duas ou três etapas. Em sua primeira etapa, de destilação atmosférica, são retirados o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), o Nafta, o querosene, o diesel e alguns resíduos atmosféricos.

Os resíduos atmosféricos provenientes da primeira etapa vão para uma segunda etapa, a de destilação a vácuo. Nela se separam as parcelas de gasóleo leve, pesada, além de um resíduo de vácuo.

Caso haja uma terceira etapa (Figura 1), a de desasfaltação por solvente, utilizam-se alcanos de baixa massa molar (normalmente o propano ou o butano) para obtenção do resíduo asfáltico. Se não houver a terceira etapa, o resíduo de vácuo passa por avaliação dentro de especificações para ser comercializado como ligante asfáltico.

Figura 1 - Esquema simplificado da Produção de Asfalto (3 estágios de destilação)



Fonte: PINTO, S. 1998 apud NEGRÃO, 2006.

No Brasil, a empresa responsável por fornecer os asfaltos básicos, conhecidos como Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP e Asfalto Diluído de Petróleo – ADP é a Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRAS. Estes asfaltos são produzidos em refinarias, transportados e vendidos ao mercado consumidor ou podem servir de insumo para que os Distribuidores privados produzam asfaltos e emulsões asfálticas especiais, que serão abordados no Módulo 2 deste curso.

5. CARACTERÍSTICAS, ESTRUTURA E COMPORTAMENTO DO ASFALTO

O Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP é um derivado de petróleo utilizado como ligante dos agregados minerais na produção de misturas asfálticas. É um material semissólido à temperatura ambiente, de cor marrom a preta com propriedades adesivas, termoplástico, impermeável à água, viscoelástico e pouco reativo. Possui a temperatura associada a todas as suas propriedades físicas. Por isso é necessário que seja aquecido para que ele tenha a consistência adequada ao uso como revestimento asfáltico.

O CAP possui uma complexa composição química, variando com o petróleo e o processo de produção. Após seu refinamento, o ligante asfáltico resultante possui entre 90 e 95% de hidrocarbonetos e entre 5 e 10 % de heteroátomos (Enxofre, Oxigênio, Nitrogênio e alguns metais).

Os cimentos asfálticos de petróleo (CAPs) não devem conter água, porque espumam com o aquecimento, causando até explosões.

A combinação química dos elementos é extremamente complexa e há grande dificuldade em relacionar sua composição com as propriedades do material quando submetido à deformação ou à força de cisalhamento (reológicas).

Segundo a *American Society for Testing and Materials* - ASTM, atualmente denominada *ASTM International*, as frações do asfalto são divididas em: saturadas, nafteno-aromáticas, polar-aromáticas e asfaltenos. Para a realização deste método emprega-se a ASTM D 4124-01.

A classificação europeia é feita de modo similar, com a denominação SARA. A separação dos constituintes é realizada por cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama. O ligante é inicialmente colocado em solução de heptano normal (n-heptano). Dessa solução é possível separar a parte sólida, que é denominada Asfaltenos, e a parte líquida denominada Maltenos. Realiza-se a cromatografia da parte solúvel do material restante e ele é classificado em saturados, aromáticos e resinas pela coloração resultante do ensaio.

Os saturados apresentam coloração clara, transparente; os aromáticos são de coloração amarelada/alaranjada e as resinas apresentam coloração marrom/preta, conforme Figura 2.

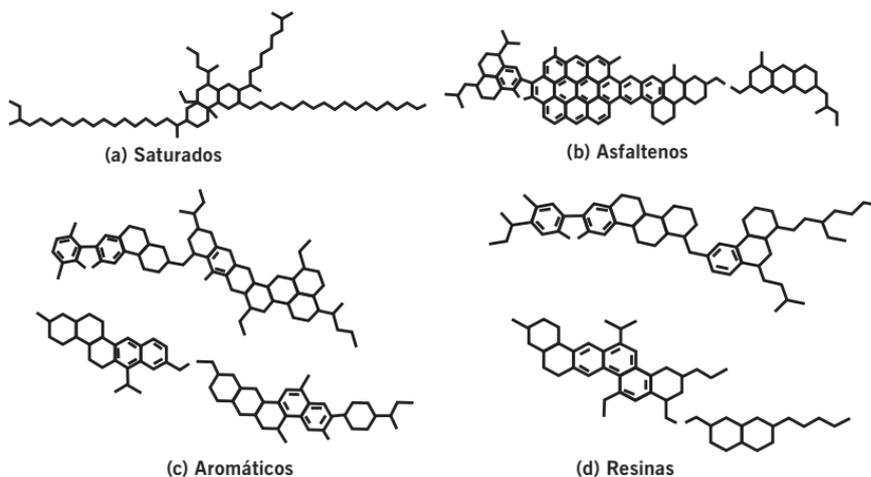
Figura 2 - Classificação SARA da estrutura por cromatografia



Fonte: Adaptado de HANDLE *et al.*, 2016.

Os componentes do asfalto (Figura 3) se combinarão de diferentes formas, a depender do petróleo de origem e do processo de refino a que foi submetido. A fração Saturada na composição do petróleo varia entre 5 e 20 %. A fração Aromática varia entre 45 e 60 %. A fração das Resinas varia entre 15 e 25 %. Já a fração de Asfaltenos entre 5 e 25 %.

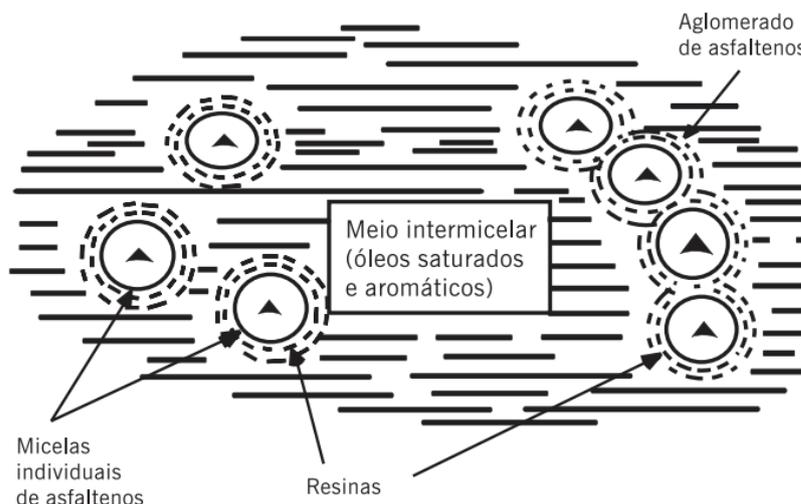
Figura 3 - Representação esquemática dos componentes dos asfaltos



Fonte: SHELL, 2003 apud BERNUCCI *et al.*, 2008.

Os asfaltenos são altamente polarizáveis e de elevado peso molecular. A elevada concentração de asfaltenos torna o asfalto mais duro. As resinas possuem natureza polar e são fortemente adesivas. Os aromáticos são não polares e possuem baixo peso molecular. Os saturados são óleos viscosos não polarizáveis. As diferentes combinações destes compostos resultarão em diferentes estruturas, atualmente explicada por dois modelos.

Figura 4 - Modelo de Micelas de Yen



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008.

O modelo de Yen considera que o asfalto é uma dispersão coloidal. Os asfaltenos estarão peptizados pelas resinas, permitindo a dispersão dos asfaltenos no meio intermicelar (composto por óleos saturados e aromáticos). A proporção resina e aromático que comanda o comportamento reológico do ligante asfáltico.

Quando há uma proporção adequada de moléculas de resinas e de aromáticos, suficiente para pepitizar os asfaltenos e dispersá-los no meio intermicelar, as micelas terão boa mobilidade e o asfalto passa a ter comportamento do tipo solução (SOL). O comportamento gelatinoso (GEL) se dá quando não há o equilíbrio entre resinas e aromáticos. A maioria dos ligantes asfálticos utilizados é do tipo SOL-GEL. Uma estrutura intermediária entre os dois comportamentos.

Asfaltos de composições químicas diferentes podem apresentar características físicas similares, desde que derivados de óleos diferentes. Desta forma, é impossível definir por meio da composição química o comportamento do ligante visando seu desempenho na pavimentação. E, por muitas vezes, o modelo de Yen não se mostrou coerente com os resultados obtidos por ensaios de cromatografia por exclusão de tamanho, microscópio eletrônico e ressonância nuclear magnética.

O modelo proposto pelo SHRP (Strategic Highway Research Program), também denominado de modelo americano, considera que há numerosos tipos possíveis de interação entre as moléculas dos ligantes. O programa identificou grupamentos ácidos e básicos juntos (substâncias anfóteras) que vão controlar a viscosidade do ligante. O modelo estrutural classifica os compostos constituintes do CAP em polares e não polares, ligados por forças intra e intermoleculares, que são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que explicam as características viscoelásticas do ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

6. ESPECIFICAÇÕES BRASILEIRAS

O Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP é especificado pela NORMA DNIT 095/2006 (Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de Material). O CAP é o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de pavimentos. Eles são classificados, conforme sua penetração, em CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200. Essa classificação é dada pela RESOLUÇÃO ANP Nº 897, de 24/11/2022, que pode ser consultada em:

<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anp-n-897-de-18-de-novembro-de-2022-445759308>.

Para especificá-los é necessário conhecer alguns ensaios de caracterização: o ensaio de penetração, o ensaio de ponto de amolecimento, a especificação de Índice de Susceptibilidade Térmica - IST, a viscosidade Saybolt Furol, a viscosidade Brookfield, o ensaio de ductilidade, a determinação do ponto de fulgor, e a simulação o envelhecimento do ligante (RTFOT).

Os limites são estabelecidos em norma conforme Figura 5, adaptada da NORMA DNIT 095/2006 - EM. Quando de sua atualização (2006), a norma levou em consideração a classificação do CAP por penetração e a consideração do ponto de amolecimento mínimo e a ductilidade mínima, além da faixa aceitável do índice de suscetibilidade térmica e a inclusão dos ensaios RTFOT e Brookfield.

Figura 5 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, mín		192	141	110	80			
a 150 °C, mín		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

7. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

7.1 DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO – NORMA DNIT 155/2010-ME

O ensaio de penetração mede a consistência do asfalto utilizado no Brasil para a classificação dos CAPs. A penetração é a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetra numa amostra de volume padronizado de ligante, num tempo de cinco segundos na temperatura de 25 °C.

Cada ensaio realiza três medidas individuais de penetração. A média dos três valores é utilizada e a diferença entre elas não pode exceder o limite especificado em norma.

Este ensaio sozinho não caracteriza perfeitamente a qualidade do CAP, mas é utilizado como parâmetro de classificação.

TOME NOTA:

- Ensaios de penetração com valores abaixo de 15 (0,1 mm) estão associados a asfaltos envelhecidos e quebradiços;
- O grau de dureza do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. Assim, um CAP 50/70 é mais duro que um CAP 85/100.

Figura 6 - Ensaio de penetração



Fonte: Adaptado de THIVES, 2016.

A Tabela 01 mostra os limites para penetração que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 1 - Limites estabelecidos para penetração, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.



Um vídeo explicativo do ensaio pode ser observado por meio do link:

<https://youtu.be/ONuIC87xDPY>

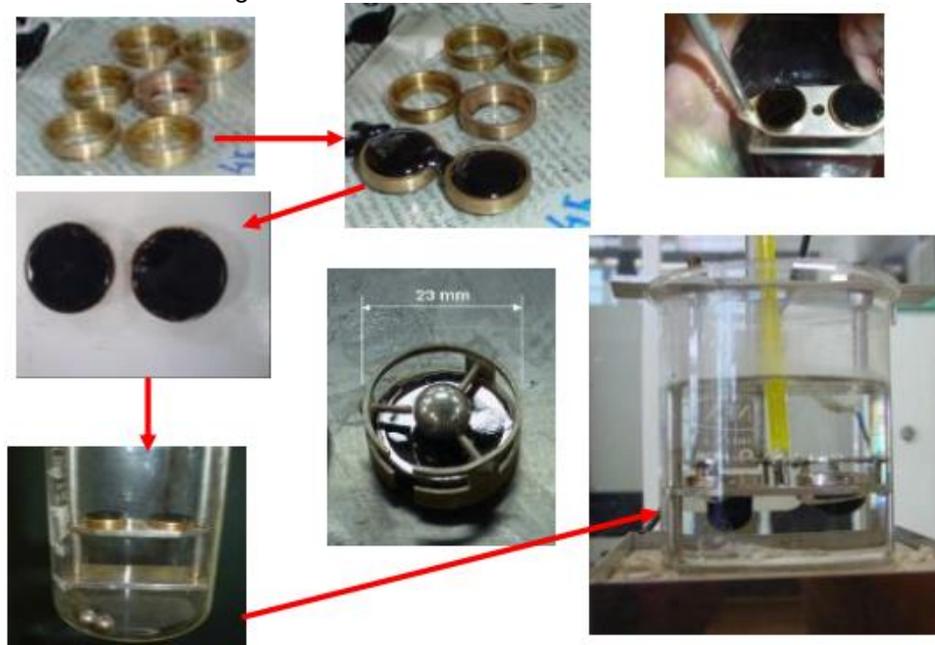
7.2 DETERMINAÇÃO DO PONTO DE AMOLECIMENTO - MÉTODO DO ANEL E BOLA – NORMA DNIT 131/2010-ME

O ensaio do ponto de amolecimento é utilizado para fazer uma estimativa da susceptibilidade térmica do asfalto. Ele determina a temperatura na qual o asfalto amolece quando é aquecido em condições padronizadas. O ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera padronizada, atravessando um anel cheio de asfalto, percorre uma distância de 25,4 mm e toca a placa de referência.

O conjunto (anel com asfalto + esfera) é colocado dentro de um banho de água, em um béquer aquecido a uma taxa controlada de 5 °C/minuto. Quando o ligante amolece o suficiente para não mais suportar o peso da esfera, esta e o asfalto deslocam-se em direção ao fundo do béquer. A temperatura é marcada no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio.

O teste é conduzido com duas amostras do mesmo material. Se a diferença de temperatura entre estas amostras exceder a 2 °C o ensaio deve ser refeito. As condições de realização do ensaio também o fez ser conhecido como o ensaio do “anel e bola”.

Figura 7 - Ensaio do Ponto de Amolecimento



Fonte: THIVES, 2016.

A Tabela 02 mostra os limites para o ponto de amolecimento que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 2 - Limites estabelecidos para ponto de amolecimento, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Ponto de Amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.



Abaixo estão listados dois links de acessos a vídeos explicativos do ensaio:

1. <https://youtu.be/H6EWOqI0yyA>
2. <https://youtu.be/nIrcry5uXB8>

7.3 ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA - IST (NORMA DNIT 095/2006 EM)

O índice de suscetibilidade térmica do CAP é a avaliação da sensibilidade do CAP às variações de temperatura. Os dados de temperatura e penetração se alinham em uma curva numa escala decimal.

A Tabela 03 mostra os limites para o índice de suscetibilidade térmica que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 3 - Limites estabelecidos para índice de suscetibilidade térmica, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

Dessa forma, a norma de especificação do CAP, a DNIT 095/2006 EM, estabelece que o índice deve ser calculado conforme equação (1) ou dados da Tabela 4. Os dados utilizados para o cálculo do IST são obtidos pelos ensaios de Ponto de amolecimento e de Penetração.

$$IST = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (1)$$

Onde:

(T °C)= Ponto de amolecimento;

PEN= penetração a 25 °C, 100 g, 5 seg.

Tabela 4- Índice de suscetibilidade térmica

Penetração 25°C, 100g, 5s (NBR 6576) 0,1 mm	Ponto de Amolecimento, ° C (NBR 6560)																Penetração 25°C, 100g 5s (NBR 6576) 0,1mm
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	
30	5,7	5,4	5,1	4,8	4,5	4,2	4,0	3,7	3,4	3,2	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	30
40	5,3	5,0	4,7	4,4	4,1	3,8	3,5	3,2	2,9	2,7	2,4	2,2	1,9	1,7	1,4	1,2	40
50	5,0	4,7	4,3	4,0	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1,7	1,4	1,2	0,9	0,7	50
60	4,7	4,4	4,0	3,7	3,4	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,6	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3	60
70	4,5	4,1	3,7	3,4	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,1	0,1	70
80	4,2	3,8	3,4	3,1	2,7	2,4	2,1	1,7	1,4	1,1	0,8	0,5	0,3	0,0	0,3	0,5	80
90	3,9	3,5	3,2	2,8	2,4	2,1	1,7	1,4	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,4	0,6	0,9	90
100	3,7	3,3	2,9	2,5	2,1	1,8	1,4	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,4	0,7	1,0	1,2	100
110	3,5	3,0	2,6	2,2	1,9	1,5	1,2	0,8	0,5	0,2	0,1	0,5	0,7	,0	1,3	1,6	110
120	3,2	2,8	2,4	2,0	1,6	1,2	0,9	0,5	0,2	0,1	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,9	120
130	3,0	2,6	2,1	1,7	1,3	1,0	0,6	0,2	0,1	0,4	0,7	1,1	1,4	1,6	1,9	2,2	130
140	2,8	2,3	1,9	1,5	1,0	0,7	0,3	0,0	0,4	0,7	1,0	1,4	1,7	1,9	2,2	2,5	140
150	2,6	2,1	1,7	1,2	0,8	0,4	0,1	0,3	0,7	1,0	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	150
160	2,3	1,9	1,4	1,0	0,6	0,2	0,2	0,6	0,9	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	160
170	2,1	1,6	1,2	0,7	0,3	0,1	0,5	0,8	1,2	1,5	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	170
180	1,9	1,4	0,9	0,5	0,1	0,3	0,7	1,1	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	180
190	1,7	1,2	0,7	0,3	0,2	0,6	1,0	1,4	1,7	2,1	2,4	2,7	3,1	3,4	3,7	3,9	190
200	1,4	0,9	0,5	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	200

Fonte: DNIT, 2006.

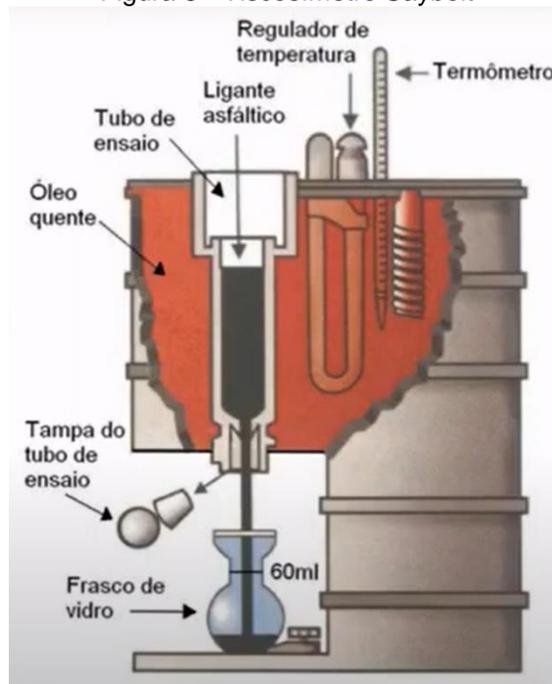
TOME NOTA:

- Valores superiores a +0,7 estão associados a CAPs oxidados, enquanto valores inferiores a -1,5 estão relacionados a CAPs sensíveis a elevadas temperaturas.

7.4 DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL À ALTA TEMPERATURA - MÉTODO DA PELÍCULA DELGADA (ABNT-MB 517) (NORMA DNER-ME 004/94)

O ensaio de viscosidade Saybolt-Furol tem a finalidade de medir a consistência dos materiais asfálticos em estado líquido. O equipamento conhecido como Viscosímetro Saybolt (Figura 8) é utilizado para realização do ensaio que deve ser executado a várias temperaturas, conforme especificação.

Figura 8 - Viscosímetro Saybolt



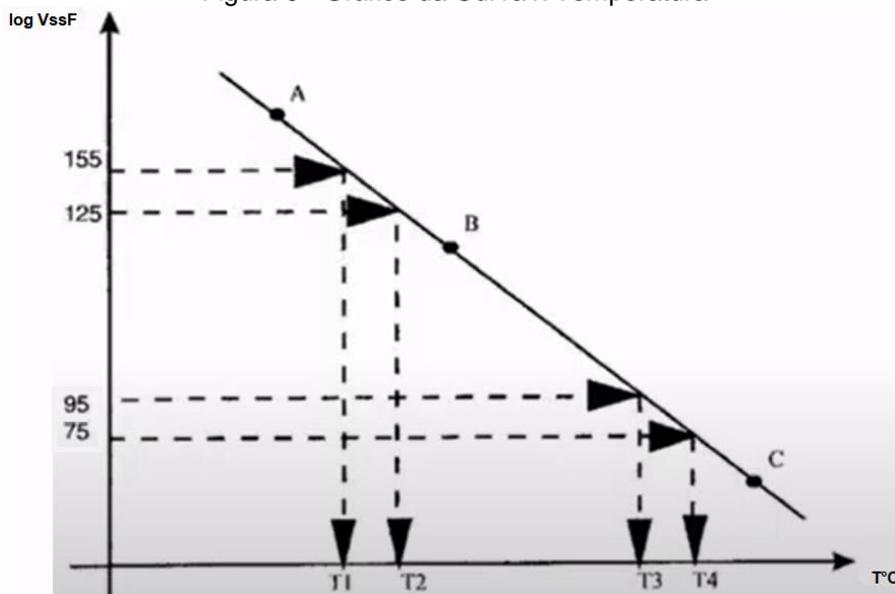
Fonte: Adaptado de THIVES, 2016.

O tempo que 60 ml de asfalto leva para fluir através de um orifício a uma determinada temperatura (25° a 170 °C) é denominado VSF.

A finalidade da determinação do VSF a diferentes temperaturas é para quantificar as temperaturas de trabalho do asfalto, quais sejam: temperatura de aquecimento do ligante, temperatura de aquecimento do agregado e temperatura de compactação da mistura. Após a realização do ensaio é possível traçar a curva: Temperatura *versus* Viscosidade.

A curva Temperatura *versus* Viscosidade possibilita determinar as viscosidades para compactação na pista e para usinagem. Na Figura 9 observa-se que a T1 é a temperatura do CAP que corresponde a uma VSF de 155 s. A T2 representa a temperatura do CAP que corresponde a uma VSF de 125 s. A T3 representa a temperatura do CAP que corresponde a uma VSF de 95 s e a T4 representa a temperatura do CAP que corresponde a uma VSF de 75 s.

Figura 9 - Gráfico da Curva x Temperatura



Fonte: Adaptado de THIVES, 2016.

A Tabela 05 mostra os limites para a Viscosidade Saybolt-Furol que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 5 - Limites estabelecidos para Viscosidade Saybolt-Furol, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, min		192	141	110	80			
a 150 °C, min		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.



Um vídeo explicativo do ensaio pode ser observado por meio do link:

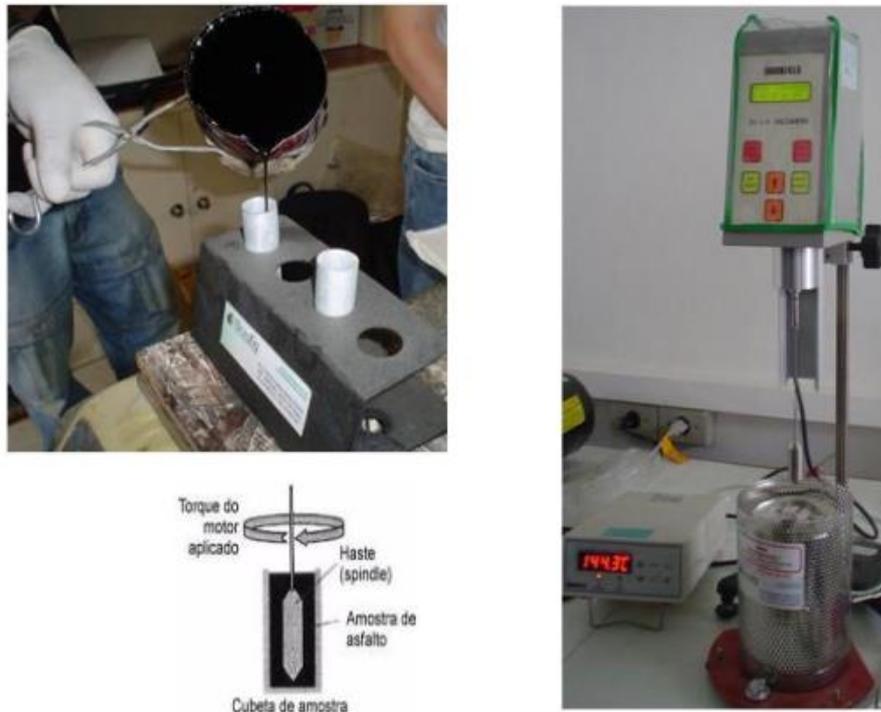
<https://youtu.be/Y7zY7yzZD-Q>

7.5 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE EM TEMPERATURAS ELEVADAS USANDO UM VISCOSÍMETRO ROTACIONAL (ABNT NBR 15184)

O ensaio de determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional, como por exemplo, o viscosímetro Brookfield, é utilizado para caracterizar a rigidez/fluidez do CAP. A medição da viscosidade é feita pela avaliação do torque necessário para rodar uma haste, também denominado *spindle*, imerso na amostra na temperatura do ensaio a uma velocidade constante.

Diferente da viscosidade de Saybolt-Furol, que é uma medida empírica, a viscosidade Brookfield é uma medida científica. A Norma descreve o procedimento para determinação da viscosidade aparente de asfaltos a temperaturas compreendidas entre 38 °C e 260 °C, usando um viscosímetro rotacional e um sistema de aquecimento acoplado ao controlador de temperatura para manter a temperatura de ensaio.

Figura 10 - Ensaio de determinação de viscosidade Brookfield



Fonte: THIVES, 2016.

Figura 11 - Diferentes *spindles* utilizados no Viscosímetro Brookfield



Fonte: Adaptado de AMETEK BROOKFIELD, 2022.

TOME NOTA:

- O equipamento pode ser aplicado com vários tipos de hastes (*spindles*) e para cada tipo de material ou faixa de temperatura é preciso especificar a rotação e o número correto do *spindle*.

O ensaio de determinação da Viscosidade Brookfield é indicado para medir a viscosidade de CAPs convencionais, asfaltos modificados por polímeros elastoméricos e asfalto-borracha. Essas variações do CAP serão abordadas no Módulo 2.

A partir do ensaio é possível obter o gráfico de temperatura *versus* viscosidade para projeto de mistura asfáltica. O valor obtido é uma medida de viscosidade dinâmica expressa em centiPoise (cP).

A Tabela 06 mostra os limites para a Viscosidade Brookfield que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 6 - Limites estabelecidos para Viscosidade Brookfield, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.



Um vídeo explicativo do ensaio pode ser observado por meio do link:

<https://youtu.be/3C9qSpObpZw>

7.6 DETERMINAÇÃO DE DUCTILIDADE (DNER-ME 163/98)

A ductilidade é a propriedade que o material tem de suportar grandes deformações sem ruptura. Quanto mais dúctil o material, mais flexível ele é.

Para a realização do ensaio considera-se a distância, em centímetros, que a amostra em condições especificadas e padronizadas, submetida a uma tração, se rompe. O objetivo do ensaio é avaliar a resistência à tração do ligante. O ensaio também é empregado para retorno elástico de asfaltos modificados.

A ductilidade é dada pelo alongamento, em centímetros, obtido antes da ruptura de uma amostra de CAP com uma seção de aproximadamente 1 cm², em banho de água a 25 °C, submetida pelos dois extremos à tração de 5 cm/minuto.

Figura 12 - Ensaio de ductilidade



Fonte: THIVES, 2016.

A Tabela 07 mostra os limites para a ductilidade que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 7 - Limites estabelecidos para ductilidade, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.



Um vídeo explicativo do ensaio pode ser observado por meio do link:

<https://youtu.be/elynBV4u80M>

7.7 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE FULGOR E DE COMBUSTÃO (DNER-ME 148/94)

O Ponto de Fulgor é um ensaio ligado a segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem. A menor temperatura em que os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por

contato a uma chama padronizada é denominada Ponto de Fulgor (Bernucci *et al.*, 2008). Este ensaio também é conhecido como ensaio do Ponto de Fulgor no vaso aberto Cleveland.

A Tabela 08 mostra os limites para o Ponto de Fulgor que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 8 - Limites estabelecidos para Ponto de Fulgor, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 148/94

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

Temperaturas muito baixas de Ponto de Fulgor podem indicar contaminação por frações leves, como de solventes ou combustíveis.

O ensaio determina a classificação de segurança quanto aos riscos de armazenagem, manuseio e também de transporte de produtos combustíveis.

Figura 13 - Modelos de equipamentos para ensaio do Ponto de Fulgor



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008.

TOME NOTA:

- Valores de Pontos de Fulgor de CAP são normalmente superiores a 230 °C.



Um vídeo explicativo do ensaio pode ser observado por meio do link:

<https://youtu.be/VxluAe8tZ4Y>

7.8 DETERMINAÇÃO DO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO (RTFOT) – ASTM D 2872

O ensaio RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*) simula o envelhecimento do ligante no curto prazo. O ensaio permite a formação de películas bem delgadas, de aproximadamente 1,25 mm em cilindros de vidro com 35 g de ligante (Figura 14). O envelhecimento é provocado no ligante por oxidação e evaporação em ação contínua.

Uma injeção de ar contínua, a cada 3 a 4 segundos, é soprada no ligante enquanto este é continuamente girado dentro de um recipiente de vidro a 163 °C por 85 minutos. Posteriormente, os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, ductilidade e viscosidade são novamente realizados com a amostra envelhecida para efeito de comparação.

A variação máxima da massa, conforme equação (2), é apresentada em porcentagem, sendo definida como:

$$M = \frac{(M_{inicial} - M_{final})}{M_{inicial} \times 100} \quad (2)$$

Onde:

$M_{inicial}$ = massa inicial antes do ensaio de RTFOT;

M_{final} = massa final após o ensaio de RTFOT.

A Penetração retida é definida, conforme equação (3), como:

$$PEN_{retida} = \left(\frac{PEN_{final}}{PEN_{inicial}} \right) \times 100 \quad (3)$$

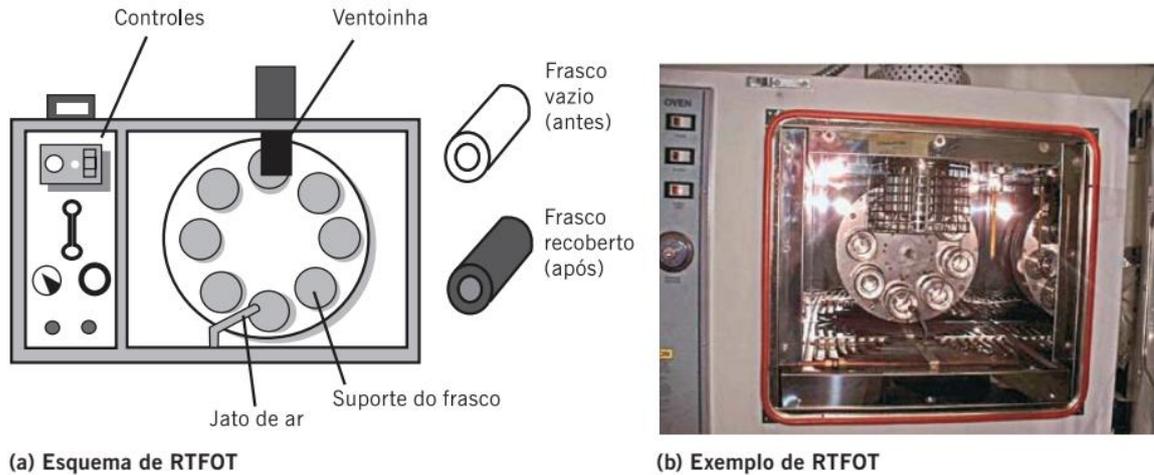
Onde:

$PEN_{inicial}$ = Penetração inicial antes do ensaio de RTFOT;

PEN_{final} = Penetração final após o ensaio de RTFOT.

O ensaio determina a perda por evaporação ou o ganho de peso por oxidação.

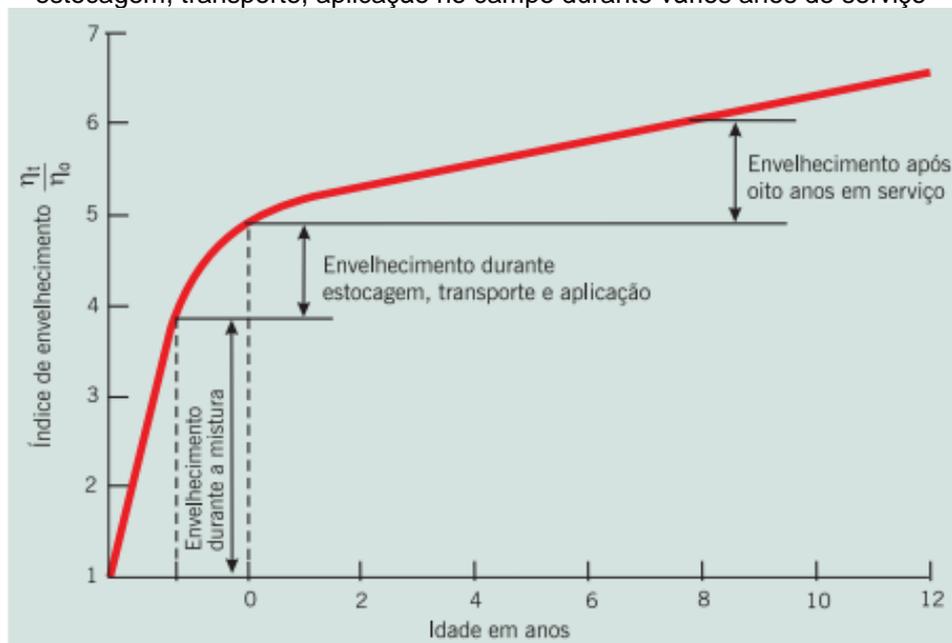
Figura 14 - Estufa de filme rotativo ou película delgada rotacional (RTFOT)



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008.

A Figura 15 mostra um exemplo de um gráfico de medida do efeito do envelhecimento em algumas fases de utilização do ligante, tendo sido utilizado como referência a avaliação do seu efeito nas características físicas que levam ao endurecimento do ligante, que é verificado pela diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 15 - Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo durante vários anos de serviço



Fonte: WHITEOAK, 1980, apud SHELL, 2003, apud BERNUCCI *et al.*, 2008

A Tabela 09 mostra os limites estabelecidos para as amostras após o ensaio RTFOT que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 9 - Limites estabelecidos após RTFOT, conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.



Um vídeo explicativo do ensaio pode ser observado por meio do link:

<https://youtu.be/793uQ29cqys>

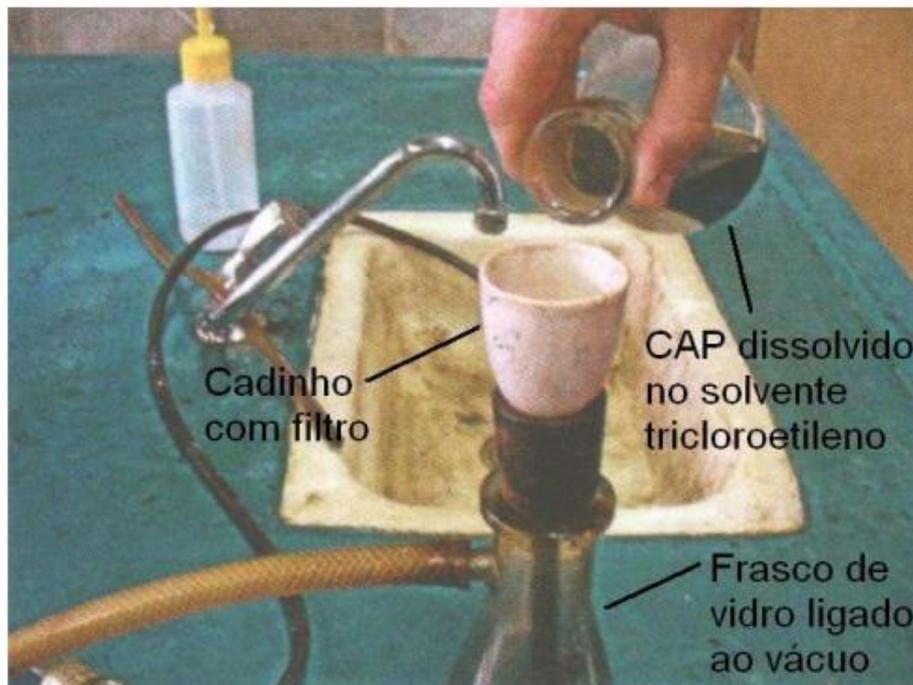
7.9 DETERMINAÇÃO DA SOLUBILIDADE EM TRICLOROETILENO (ABNT NBR 14855)

O ensaio de solubilidade é realizado dissolvendo uma amostra de asfalto em solvente sendo então filtrada através de um canudinho perfurado que é ligado ao topo de um frasco ligado ao vácuo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A fração solúvel é o constituinte ativo do ligante asfáltico. Dessa forma, o ensaio determina o grau de pureza do asfalto (teor de betume). A porção insolúvel, que fica retida no filtro, é constituída de impurezas.

A Figura 16 ilustra o ensaio de solubilidade em tricloroetileno.

Figura 16 - Ensaio de solubilidade



Fonte: VIANA, 2015.

A Tabela 10 mostra os limites estabelecidos solubilidade que constam na NORMA DNIT 095/2006 EM.

Tabela 10 - Limites estabelecidos conforme NORMA DNIT 095/2006 EM

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

8. REFERÊNCIAS

ABEDA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Rio de Janeiro, ABEDA, 2001. 2ª ed. 2010

AMETEK, Brookfield. *LV e RV_HA_HB Spindles*. Disponível em: <https://www.brookfieldengineering.com/products/accessories/spindles-cones-cups-chambers/lv-spindles>. Acesso em 20 abr. 2022.

BERNUCCI, *et al.* *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. 2008.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. L. B.; SOARES, J. B. Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/livros/>

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Anuário Estatístico dos Transportes, 2020. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2020/>. Acesso em 15 abr. 2022.

HANDLE *et al.* *The bitumen microstructure: a fluorescent approach*. Mater Struct 49, 167–180 (2016). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0484-3>

IA – INSTITUTO DO ASFALTO. *Manual de asfalto*. Rio de Janeiro: IA, 2001.

NEGRÃO, D. P. *Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Tipo RET para Aplicações em Pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

REIS, R. M. M.; TEIXEIRA, L. H.; CONSTANTINO, R.; OMENA, W. Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Rio de Janeiro, ABEDA, 2001. 2ª ed. 2010. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/livros/>

THIVES, L. P. *Comportamento dos materiais empregados na pavimentação: Ligantes Asfálticos*. 2016. 16 p. Notas de Aula.

VIANA, H. M. F. *Aula prática de pavimentação*. 2015. Notas de Aula. Disponível em: <https://engftc.files.wordpress.com/2015/09/pavimentac3a7c3a3o-notas-de-aula-prc3a1tica.pdf>. Acesso em 26 abr. 2022.