

## Avaliação dos Parâmetros Marshall em Misturas Asfálticas de CBUQ com Diferentes Temperaturas Durante a Compactação

Aloyzio de Souza Neto

Engenheiro, Universidade Paulista, São Paulo, Brasil, aloyzio9@hotmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Professor Adjunto, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, heber@det.ufc.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor Associado, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Fernando Feitosa Monteiro

Doutorando, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, engffmonteiro@gmail.com

**RESUMO:** As temperaturas de usinagem e de compactação da mistura asfáltica devem respeitar aquelas determinadas anteriormente em projeto. A temperatura não pode estar nem abaixo nem acima da estabelecida em projeto, uma vez que esta alteração implica diretamente nas demais características da mistura, como por exemplo, a viscosidade. O asfalto quando compactado de forma incorreta, pode causar uma série de prejuízos e danos expressivos aos cidadãos e ao município. Desta forma, o objetivo deste trabalho é mostrar que o controle de temperatura na compactação asfáltica pode resultar em um asfalto com qualidade elevada e vida útil prolongada. A metodologia de dosagem e a confecção dos corpos-de-prova foram realizadas através do Método Marshall, avaliando as propriedades volumétricas e mecânicas do CBUQ compactado com diferentes temperaturas (115, 130, 145, 160 e 175°C). Os resultados obtidos através dos ensaios realizados em laboratório mostraram que a temperatura mínima para a compactação asfáltica seria de 145°C, enquanto que a temperatura ótima para compactação seria entre 160 e 175°C para as misturas analisadas. A partir dos ensaios realizados, verifica-se a importância da temperatura durante a compactação asfáltica em misturas asfálticas afim de atender exigências de projeto, buscando o aprimoramento na qualidade e durabilidade do revestimento asfáltico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compactação asfáltica, Dosagem Marshall, Temperatura.

**ABSTRACT:** Machining and compaction temperatures of the asphalt mixtures must respect Project designations. The temperature can be neither below nor above that established in the project, since this change directly affects the other mixture characteristics, such as viscosity. A series of losses and significant damage to citizens and the municipality can be made by incorrectly asphalt compaction. The aim of this work is to show that the temperature control during asphalt compaction can result in an asphalt with high quality and prolonged useful life. The dosing methodology and the preparation of the specimens were carried out using the Marshall Method, evaluating the volumetric and mechanical properties of the CBUQ compacted with different temperatures (115, 130, 145, 160 and 175 ° C). The results obtained through laboratory tests showed that the minimum temperature for asphalt compaction would be 145 ° C, while the optimum temperature for compaction would be between 160 and 175 ° C for the analyzed mixtures. The importance of temperature during asphalt compaction in asphalt mixtures is verified in order to meet project requirements, seeking to improve the quality and durability of the asphalt coating.

**KEYWORDS:** Asphalt compaction, Marshall test, Temperature.

## 1 Introdução

O revestimento asfáltico quando compactado sem um controle adequado de temperatura, pode sofrer uma série de efeitos que podem causar problemas futuros. No caso da mistura asfáltica com elevadas temperaturas, a mistura tende a fluir e deformar-se pelo fato da maior lubrificação e menor ligação exercida entre o ligante asfáltico em temperaturas excedentes. Porém, quando a temperatura é muito baixa na mistura asfáltica, o ligante asfáltico transforma-se em plástico e pegajoso, tornando mais difícil a compressão da mistura e a obtenção de um estado mais denso (BERNUCCI *et al.*, 2010). O presente trabalho analisa o processo de compactação do asfalto, demonstrando a influência da temperatura do revestimento asfáltico no momento da compactação, fator este que controla diretamente a funcionalidade e a vida útil do pavimento. Assim, as propriedades volumétricas e mecânicas do CBUQ compactado com diferentes temperaturas (115, 130, 145, 160 e 175°C) foram avaliadas a partir de ensaios Marshall.

## 2 Propriedades mecânicas de misturas asfálticas

As principais propriedades mecânicas necessárias para as misturas asfálticas segundo Coelho (1992) são: trabalhabilidade, durabilidade; estabilidade; flexibilidade, resistência por aderência superficial. A trabalhabilidade é relativa as operações de homogeneização e espalhamento da massa, devendo ocorrer sem grande dificuldade (COELHO, 1992). A durabilidade é a capacidade de conservação das misturas contra a ação do clima, do tempo e do tráfego, devendo haver um bom envolvimento dos agregados pelo asfalto devido a uma boa homogeneização, ao teor ótimo de ligante e a uma compactação eficiente com um baixo volume de vazios. A estabilidade é a capacidade de uma mistura asfáltica suportar os carregamentos provenientes do tráfego sem sofrer danos irreversíveis e permanentes. (COELHO, 1992). Ainda segundo o autor, a flexibilidade é a capacidade da mistura ter eficiência para resistir à flexão causada pela ação de cargas repetidas sem que ocorra fadiga do pavimento e deformações permanentes da camada da base. Quantidade, características e temperatura do ligante podem influenciar nesta propriedade. Por fim, a resistência por aderência superficial é a capacidade do pavimento de resistir ao escorregamento dos pneus dos veículos, que também depende diretamente das características dos pneus e do seu estado de conservação. Os agregados utilizados na composição da mistura asfáltica são importantes na obtenção de camadas com textura e atrito superficial conveniente a oferecer resistência ao deslizamento dos pneus dos veículos, ou seja, resistência por aderência superficial.

Segundo Senço (2008), o projeto de concepção de um traço de concreto asfáltico para pavimentação é constituído de um estudo de seleção e dosagem dos materiais constituintes, tendo por finalidade enquadrá-los economicamente nas especificações estabelecidas. Dentre as principais metodologias adotadas para o projeto de dosagem do concreto asfáltico, pode-se citar a metodologia Marshall, a qual tem como parâmetros principais, as medidas de estabilidade e influencia Marshall, bem como as propriedades volumétricas da mistura. A metodologia de dosagem Marshall é de fácil compreensão, rápida execução e baixo custo de equipamentos. Estes fatores facilitam com que este método seja amplamente empregado pelo mundo e inclusive no Brasil. Este método de dosagem consiste basicamente na moldagem e compactação a quente de uma série de corpos de prova com diferentes teores de ligante, dentro de moldes cilíndricos metálicos que são armazenados ao ar livre por pelo menos 24 horas. Após passado esse tempo são imersos em um reservatório com água a 60°C. Então são retirados do banho e imediatamente são levados a prensa para a compressão diametral, através de um molde cilíndrico, criado por Marshall. Com isso, encontra-se a máxima carga suportada pelos corpos e prova que é denominada de estabilidade Marshall e a deformação causada pela ruptura de fluência. Encontra-se também a densidade, o volume de vazios, e a relação entre vazios dos agregados preenchidos de betume.

### 3 Materiais e Métodos

Neste item, apresentam-se os materiais e equipamentos que serão utilizados para a realização deste trabalho, e os procedimentos de dosagem das misturas pelo método Marshall (DNER, 1995a), bem como a caracterização dos agregados e ligantes. O ensaio de granulometria dos agregados, bem como do material de preenchimento foram realizados de acordo com a DNER (1998). Nesta pesquisa, o agregado graúdo empregado consiste de seixo rolado, enquanto que o agregado miúdo consiste de uma areia e o material de preenchimento de um *filler* composto por pó de calcário (Figura 1). A escolha do pó de calcário se deu pelo mesmo apresentar uma granulometria média inferior a 0,074 mm, assim, preenchendo os vazios da areia, além da mesmo apresentar um custo-benefício satisfatório. Os materiais descritos na Figura 1 foram misturados com o propósito de atender a composição de agregados da faixa “C” do DNIT. A Tabela 1 apresenta a composição dos agregados que atendem a faixa “C” do DNIT. Essa composição foi obtida a partir do método das tentativas, apresentando assim, as seguintes constituições: 56% de seixo rolado, 42% de areia e 2% de pó de calcário.

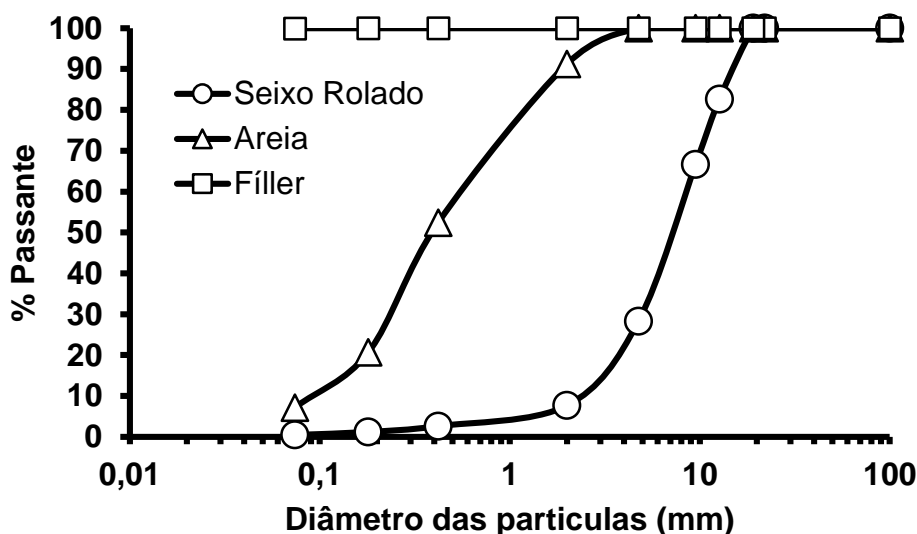


Figura 1. Granulometria dos agregados e material de preenchimento.

Tabela 1. Composição dos agregados dentro da faixa “C” do DNIT.

Peneiras (mm)	Seixo		Areia		Pó de calcário		Soma (%)	Faixa C DNIT (%)
	% passante	56%	% passante	42%	% passante	2%		
19,1	100	56	100	42	100	2	100	100
12,7	82	46	100	42	100	2	90	80-100
9,52	67	37	100	42	100	2	81	70 – 90
4,76	28	15	100	42	100	2	59	44 – 72
2,0	8	4	91	38	100	2	44	22 – 50
0,42	3	1	52	22	100	2	25	8 a 26
0,177	1	0,7	21	8	99	2	10,7	4 a 16
0,074	0,5	0,3	7	3	99	2	5,3	2 a 10

Além do ensaio de análise granulométrica, foram realizadas a determinação da absorção e densidade do agregado graúdo (DNER, 1998), da densidade real das partículas do agregado miúdo (DNER, 1995) e da adesividade (DNER, 1994a).

O ensaio de adesividade foi realizado de acordo com o DNER (1994a), utilizando-se o CAP 50/70 (ligante empregado neste trabalho) e a parte graúda do seixo e resíduo de manganês, como pode ser observado na Figura 2. Este ensaio avalia o deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura CAP-agregado é imersa em água destilada a 40° C durante 72 horas. Os resultados são caracterizados visualmente, pelo deslocamento total ou parcial da película. A caracterização do CAP50/70 constiu da realização dos seguintes ensaios: ponto de fulgor (DNER, 1994b), viscosidade Saybolt furol (DNER, 1994c), ponto de amolecimento (ABNT, 2000), penetração (DNER, 1999) e densidade (DNER, 1996). A Tabela 2 apresenta as características físicas dos agregados minerais. A Tabela 3 apresenta a caracterização do ligante (CAP 50/70) empregado neste trabalho.

Tabela 2 – Características físicas dos agregados minerais.

Ensaio	Método	Seixo	Areia	Pó de calcário
Densidade real	DNER (1995b)	2,659	2,633	2,754
Absorção	DNER (1998)	1,2	-	-
Adesividade	DNER (1994a)	Satisfatório	-	-



Figura 2. Ensaio de adesividade do seixo.

Tabela 3 – Caracterização do ligante asfáltico.

Ensaio	Método	Valores de referência	Valor obtido no ensaio
Viscosidade	135°C	274<	482
Saybolt-Furol	155°C	DNER (1994c)	274
(Ssf)	175°C	37- 285	118
Penetração, 25 °C, 100g, 5s (0,1mm)	DNER (1999)	50 a 70	52
Ponto de amolecimento (°C)	ABNT (2000)	46 (mín)	52,8
Ponto de fulgor (°C)	DNER (1994b)	235 (mín)	320
Densidade	DNER (1996)	-	0,991

A caracterização descrita na Tabela 3 indica que o ligante asfáltico está enquadrado na faixa “C” estabelecida pelo DNIT.

Na preparação para moldagem dos corpos de prova das misturas asfálticas, os agregados (faixa “C” do DNIT) e o CAP foram aquecidos separadamente, sendo o ligante aquecido na temperatura de 155 °C e os agregados a uma temperatura de 170 °C (temperatura de mistura). Foram misturados e compactados quatro corpos de prova para cada temperatura analisada 115, 130, 145, 160 e 175°C. Para a compactação, utilizou-se 1,21 kg da mistura em recipientes separado. A mistura entre ligante e agregados aquecidos ocorria quando ambos atingiam a temperatura estabelecida. Durante a compactação, cinco valores distintos de temperatura foram avaliados (115, 130, 145, 160 e 175°C), não havendo reaquecimento da mistura asfáltica após o processo de mistura. A mistura foi colocada no molde, pré-aquecido a 150° e compactada com 75 golpes em cada face do corpo-de-prova, com um soquete de 4,5 kg, caindo a uma altura de 0,45 m. Utilizou-se papel filtro em ambas as faces da mistura asfáltica antes da compactação, para evitar o contato do soquete com o material. Após a compactação, os corpos-de-prova foram retirados do molde somente após esfriarem (Figura 3a).

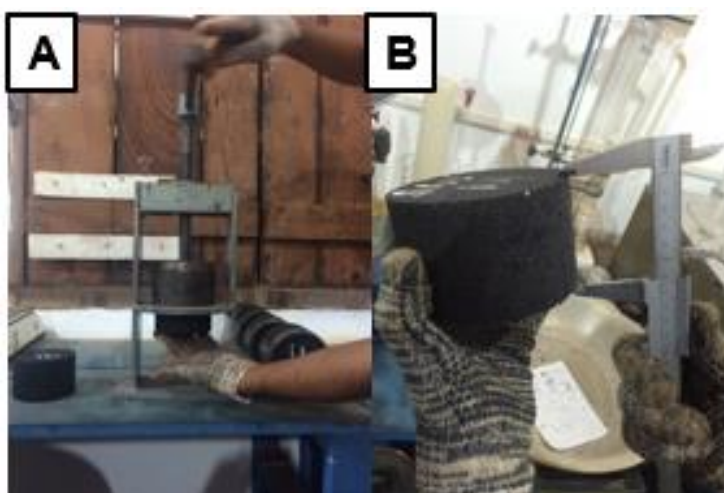


Figura 3. (a) -Retirada do corpo de prova do molde (b) -Medição do corpo de prova.

Os corpos de prova foram identificados e mantidos em repouso durante 24 h. No dia seguinte, mediam-se suas dimensões, tirando uma média de quatro valores (Figura 3b) e pesados ao ar, para obter suas características físicas (massa específica aparente, volume de vazios, relação betume vazios). Para a obtenção da densidade aparente, todos os corpos-de-prova, independentemente do teor de vazios esperado, foram pesados imersos em água. Todos os procedimentos para a determinação da densidade aparente foram realizados de acordo com o DNER (1994d). Com a densidade calculada, os corpos de prova foram colocados em banho maria, durante 30 minutos à 60 °C (Figura 4) e, após, submetidos imediatamente ao ensaio Marshall, conforme mostra a Figura 5, para determinação de suas características mecânicas de estabilidade e fluência.

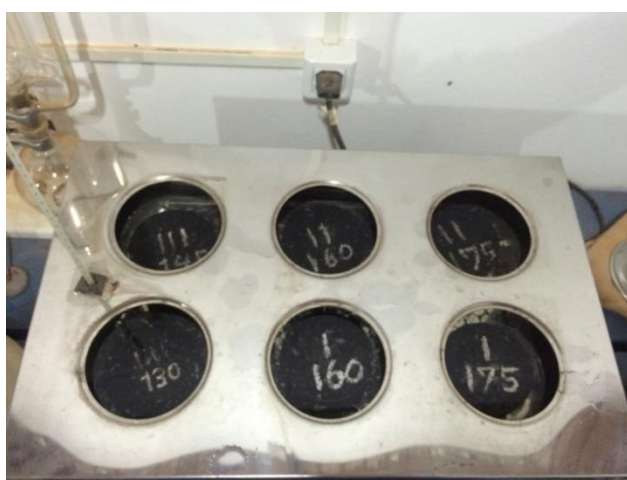


Figura 4. Corpos de prova em banho maria.



Figura 5. Prensa Marshall.

Para determinação do teor ótimo de ligante, foram admitidos três métodos:

- Teor de ligante onde o volume de vazios é inferior a 4%;
- Média entre os três valores: teor de ligante onde o volume de vazios é inferior a 4%, teor de ligante onde se encontrou o maior valor de densidade aparente e teor de ligante onde se encontrou o maior valor de estabilidade;
- Teor de ligante obtido a partir das relações com Vv (volume de vazios) e RBV (relação betume vazios);

#### 4 Resultados e Discussões

Os parâmetros empregados para avaliar o ensaio Marshall, de acordo com a ABNT (1993) são: estabilidade (kg), densidade aparente ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ), Fluência (mm), relação betume/vazios (%), volume de vazios (%) e resistência a tração (MPa). Na tabela 4, observam-se as especificações das misturas asfálticas para a camada de rolamento estabelecidas pelo DNIT (2006).

Tabela 4 – Especificações das misturas asfálticas para a camada de rolamento.

Parâmetro	Camada de Rolamento
Estabilidade (kg)	$\geq 500$
Fluência (mm)	2,0 – 4,5
Relação betume vazios (%)	75 – 82
Volume de vazios (%)	3,0 – 5,0
Resistência a tração (MPa)	

A Tabela 5 apresenta uma comparação dos valores obtidos nos ensaios com os valores propostos pelo DNIT (2006) na Tabela 4. A partir dos resultados, verifica-se que o aumento da temperatura da mistura asfáltica no durante a compactação acarreta em uma melhor adequabilidade dos valores de propriedades físicas, quando comparados com os valores propostos pelo DNIT (2006). Além disso, deve-se garantir que a massa asfáltica apresente uma temperatura elevada, propiciando assim uma melhor qualidade do serviço,

contanto, deve-se ressaltar que a mesma não deve atingir temperaturas superiores a 185 °C, devido a sua queima durante o processo de usinagem. Caso a temperatura limite seja excedida, verifica-se a ocorrência de prejuízos ambientais e financeiros. Na Tabela 5 observa-se que a partir da temperatura de 145 °C, as propriedades físicas apresentam valores concordantes com a faixa de aceitabilidade designada pelo DNIT (2006). Assim, observa-se que a temperatura de 145°C é a temperatura mínima para a compactação asfáltica dos materiais analisados neste trabalho. Observa-se assim, uma margem de temperatura para aplicação da massa, podendo esta, ser aproveitada durante a etapa de transporte da massa da usina para o local da obra, no caso da ocorrência de algum imprevisto que decorra em um maior tempo de transporte da mistura asfáltica. Avaliando os valores obtidos em laboratório e os valores de referência propostos pelo DNIT (2006), observa-se que a temperatura ideal para compactação da mistura asfáltica analisada situa-se entre 160 e 175 °C.

Tabela 5 – Valores de propriedades físicas de misturas asfálticas de referência e obtidos em ensaios.

Parâmetro	Referência (DNIT, 2006)	Valor obtido em laboratório				
Temperatura (°C)	-	115,00	130,00	145,00	160,00	175,00
Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	-	22,94	23,04	23,11	23,21	23,23
Estabilidade (kg)	≥500	514,00	584,00	688,00	813,00	825,00
Fluência (mm)	2 a 4,5	2,23	2,16	2,46	2,30	2,35
Volume de vazios (%)	3 a 5	5,02	4,62	4,31	3,91	3,82
Relação betume vazios (%)	75 a 82	72,80	74,50	75,80	77,60	78,10

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos em ensaios Marshall em amostras compostas por cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 e os agregados citados anteriormente. Corpos de prova com diferentes teores de ligantes foram moldados, buscando-se avaliar o teor ótimo de ligante. O DNIT (2006) admite o mínimo de três valores para a determinação da média. As médias dos resultados obtidos pela metodologia Marshall são apresentadas na Tabela 6. Verifica-se que o aumento do teor de ligante acarreta em um acréscimo da relação betume vazios e da densidade aparente, enquanto que a estabilidade atinge um valor de pico para o teor de 5,80%. Nota-se que a partir de um teor de ligante do valor de 6,30%, os parâmetros analisados apresentam valores adequados de acordo com os valores designados pelo DNIT (2006).

Tabela 6 – Valores de propriedades físicas de ligantes de referência e obtidos em ensaios.

Parâmetro	Referência (DNIT, 2006)	Valor obtido em laboratório				
Teor de ligante (%)	-	4,80	5,30	5,80	6,30	6,80
Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	-	22,85	23,07	23,21	23,29	23,24
Estabilidade (kg)	≥500	644,00	785,00	1027,00	733,00	683,00
Fluência (mm)	2 a 4,5	1,61	1,92	1,95	2,21	2,86
Volume de vazios (%)	3 a 5	6,83	5,23	3,91	2,83	1,60
Relação betume vazios (%)	75 a 82	61,80	70,20	77,60	84,00	90,90

## 5 Conclusões

O presente trabalho buscou exibir que o controle de temperatura na compactação asfáltica influencia de forma significativa as propriedades físicas das misturas asfálticas e de ligantes, de modo que estas propriedades estão diretamente relacionadas com a qualidade e a vida útil do asfalto. A partir da moldagem e dosagem de corpos de prova utilizando o método Marshall, foi possível analisar as propriedades volumétricas e mecânicas do CBUQ compactado com diferentes temperaturas (115, 130, 145, 160 e 175°C). Os ensaios de laboratório indicaram que a temperatura mínima para a compactação asfáltica da mistura analisada neste trabalho seria de 145°C, enquanto que a temperatura ótima para compactação estaria situada em uma faixa que varia entre 160 e 175°C. Verifica-se assim, a importância da temperatura durante a compactação asfáltica em misturas asfálticas buscando atender as requisições de projeto, almejando o aprimoramento na qualidade e durabilidade

do revestimento asfáltico. Quanto ao teor ótimo de ligante, verifica-se que o mesmo apresenta parâmetros Marshall que se enquadram aos requisitos para uso da camada de rolamento, de acordo com as especificações do DNIT (2006) a partir de um teor de 6,3%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro na concessão de bolsa de doutorado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR 6500. *Materiais betuminosos – determinação do ponto de amolecimento*. Rio de Janeiro.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., Soares, J. B. (2010) *Pavimentação asfáltica*, 3 ed, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 501p.
- Coelho, V. (1992) Considerações sobre o método Marshall. In: Reunião Anual de Pavimentação – 26º RAPV, Aracaju. *Anais... ABPv*. v. 1, p. 233-298.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994a). DNER-ME 079/94. *Agregados – adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994b). DNER-ME 148/94. *Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto cleveland)*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994c). DNER-ME 004/94. *Materiais betuminosos – determinação da viscosidade “Saybolt-Furol” a alta temperatura*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994d). DNER-ME 117/94. *Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995a). DNER-ME 043/95. *Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995b). DNER-ME 043/95. *Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). DNER-ME 193/96. *Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade e da massa específica*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). DNER-ME 081/98. *Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). DNER-ME 003/99. *Material betuminoso – determinação da penetração*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (2006). IPR – 179. *Manual de pavimentação*. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias, 278p.
- Senço, W. (2008) *Manual de técnicas de pavimentação*, 2 ed, PINI, São Paulo, SP, Brasil, 764p.