TÍTULO

MÉTODO PARA PROJETO DE MISTURAS

ÓRGÃO

DIRETORIA DE ENGENHARIA

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio. Projeto. Misturas Asfálticas.

APROVAÇÃO	PROCESSO

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Mix Design Methods**. Manual Series No. 2 (MS-2), Sixth Seventh Edition, 2015, p. 188.

MINUTA

OBSERVAÇÕES

REVISÃO	DATA	DISCRIMINAÇÃO

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

ÍNDICE

1 OBJETIVO 4
2 ESCOPO 4
3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 5
4 DEFINIÇÕES 5
4.1 Agregado 5
4.2 Fíler 5
4.3 CAP 6
4.4 Ligante asfáltico modificado por polímero 6
4.5 Ligante asfáltico modificado por borracha (AMB) 6
4.6 Teor de ligante asfáltico estimado 6
4.7 Ligante absorvido (La) 6
4.8 Ligante asfáltico efetivo em mistura asfáltica 7
4.9 Massa específica real dos agregados (γr) 7
4.10 Massa específica aparente dos agregados (γa) 7
4.11 Absorção de água pelos agregados 7
4.12 Massa específica real do fíler 7
4.13 Massa específica aparente do agregado total (Gsb) 8
4.14 Massa específica real do agregado total (Gsa) 8
4.15 Massa específica efetiva do agregado total (Gse) 8
4.16 Massa específica aparente do corpo de prova compactado (Gmb) 9
4.17 Massa específica máxima medida em amostras não compactadas (Gmm) 9
4.18 Diâmetro máximo do agregado (DM) 9
4.19 Diâmetro máximo nominal (DMN) 10
4.20 Superfície específica 10
4.21 Volume de vazios (Vv) 10
4.22 Vazios do agregado mineral (VAM) 10
4.23 Vazios cheios de Betume (VCA) 10
4.24 Relação asfalto/vazios (RAV) 10
4.25 Estabilidade Marshall 11
4.26 Fluência Marshall 11
4.27 Resistência à tração por compressão diametral (RT) 11

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

4.28 Dano por umidade induzida (DUI) 11
5 APARELHAGEM E MATERIAL 12
5.1 Aparelhagem 12
5.2 Materiais e reagentes 13
6 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 14
6.1 Amostras de agregados 14
6.2 Massa específica aparente, real e absorção dos agregados: graúdos e miúdos e fíleres 14
6.3 Granulometria dos agregados 14
6.4 Composição granulométrica da mistura asfáltica 14
6.5 Linha de densificação máxima 15
6.6 Massa de agregados por corpo de prova 15
6.7 Fracionamento dos agregados para composição da massa do corpo de prova 15
6.8 Massa de agregado e fíler por corpos de prova 16
6.9 Preparo e compactação dos corpos de prova 16
7 VOLUMETRIA DOS CORPOS DE PROVA COMPACTADOS 18
7.1 Parâmetros Marshall 19
8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS (GRÁFICOS) E ENSAIO MODELO 20
9 CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DO TEOR ASFÁLTICO ÓTIMO DE PROJETO 22
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 23

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

1 OBJETIVO

Este método, que é uma norma técnica, apresenta os procedimentos para preparação de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas a quente, tipo: concreto asfáltico e pré misturado a quente e a determinação dos parâmetros volumétricos para misturas asfálticas compactadas conforme método Marshall.

2 ESCOPO

Misturas asfálticas consistem na composição de agregados graúdos e miúdos com adição de fíler e ligantes asfálticos em proporções preestabelecidas, e quando aquecidos, o ligante asfáltico apresenta uma fluidez que permite que os materiais sejam misturados, resultando em uma mistura homogênea e trabalhável, possível de ser espalhada e compactada.

Uma mistura asfáltica com qualidade implica, necessariamente na: (i) rigorosa escolha dos materiais constituintes, (ii) adequada composição entre eles e (iii) na compatibilidade de interação entre mesmos. O projeto de dosagem norteará todas as etapas: produção, transporte e aplicação da mistura asfáltica em campo, de forma que, após a aplicação, o revestimento asfáltico propicie ao usuário, conforto e segurança ao rolamento e para o gestor da via características estruturais satisfatórias quanto a resistência e durabilidade.

Os procedimentos apresentados nessa norma contemplam as diretrizes para elaboração de dosagem de concreto asfáltico e pré misturado a quente, com distribuição granulométrica contínua e descontínua, com emprego de cimento asfáltico de petróleo (CAP), ligante asfáltico modificado por polímeros e por borracha. Nesse método são recomendados os procedimentos de compactação manual e automático.

No procedimento também é contemplado a avaliação da mistura asfáltica quanto a adesividade ligante asfáltico/agregado com emprego do ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI) conforme prescreve a norma NBR 15617[(3).]

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a realização do Projeto de Dosagem de Mistura Asfáltica descrito nessa norma, os materiais pétreos e ligantes asfálticos, que serão utilizados na dosagem devem ser submetidos aos ensaios preliminares de caracterização e enquadrar nos parâmetros de aceitação conforme consta nas normas de especificação (Exemplo ET-DE-P00/027[6]) de concreto asfáltico. Os ensaios de caracterização e os parâmetros limites para os materiais pétreos e ligantes asfálticos são:

Para a agregados graúdos e miúdos:

a) índice de forma das partículas superior a 0,5, conforme DNIT 425/2022 - ME[10];

b) Resistência a abrasão Los Angeles igual ou inferior a 50%, conforme NBR 16974 [4];

c) Equivalente de areia conforme NBR 12052 [1] da mistura dos agregados miúdos, deve ser igual ou superior a 55%;

d) Durabilidade com sulfato de sódio, perdas inferiores a 12% em cinco ciclos, conforme DNER ME 089/1994[14].

Para os ligantes asfálticos adicionados:

a) Cimento asfáltico de petróleo (CAP) classificação por penetração, atendendo ao especificado no regulamento técnico ANP no 3/2005 de 11/07/2005 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP;

b) CAPs modificados por polímero tipo SBS.

4 DEFINIÇÕES

4.1 Agregado

Materiais naturais podem ser obtidos diretamente da natureza, sendo apenas beneficiado por um processo de lavagem e/ou de fragmentação, como a pedra britada e seixo rolado. Sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil.

4.2 Fíler

Material finamente pulverizado, com diâmetro inferior a 0,075 mm se:

a) natural, constituído da mesma mineralogia dos agregados e;
b) artificial como: cal CH-I, cimento, pó calcáreo ou outro material.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

4.3 CAP

Cimento asfáltico de petróleo (CAP), substâncias compostas por hidrocarbonetos pesados, com propriedades ligantes, inflamáveis, de elevada viscosidade em temperatura ambiente, e que ocorrem na natureza ou são obtidos por fabricação, a partir da destilação do petróleo. No Brasil são regulamentos através do Regulamento técnico nº 03/200/ ANP (12/07/2005).

4.4 Ligante asfáltico modificado por polímero

São CAPs que foram adicionados polímeros (aditivos químicos e elastômeros) a sua constituição de forma a modificar (melhorar) as propriedades reológicas do CAP. No Brasil são regulamentos através do Regulamento técnico nº 04/2010 e Resolução nº 32 (21/10/2010) da ANP.

4.5 Ligante asfáltico modificado por borracha (AMB)

São CAPs que foram adicionados borracha de pneu moído a sua constituição de forma a modificar (melhorar) as propriedades reológicas do CAP. No Brasil são regulamentos através do Regulamento técnico nº 05/2008 e Resolução nº 39 (24/12/2018) da ANP.

4.6 Teor de ligante asfáltico estimado

É a quantidade de ligante, em porcentagem, que se estima através de cálculos um valor próximo ao teor ótimo de ligante asfáltico, sendo apenas orientativo. Determinado pela equação 1

$$P = 0{,}035A + 0{,}045B + Kc + 0{,}7 \qquad (1)$$

Onde: P = teor estimado de ligante asfáltico em porcentagem

A = porcentagem de agregados retidos na peneira de n° 8 (2,36 mm)

B = porcentagem de agregados passante na peneira de n° 8 (2,36 mm) e retidos na n° 200 (0,075 mm)

C = porcentagem de agregados passantes na peneira de n° 200 (0,075 mm)

K = Constante em função da % passante da peneira n° 200 (0,075 mm)

0,15 para 11,0 – 15,0 por cento que passa pela peneira de n.º 200

0,18 para 6,0 –10,0 por cento que passa pela peneira de n.º 200

0,20 para até 5,0 por cento ou menos que passa pela peneira de n.º 200

4.7 Ligante absorvido (La)

Volume de ligante asfáltico que ocupa parte dos vazios permeáveis a água da mistura asfáltica (%). Determinado pela equação 2:

$$P_{ba} = \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}}\right) * G_b * 100 \qquad (2)$$

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Onde: P_{ba} = ligante asfáltico absorvido em relação a massa do agregado (%);

G_b = massa específica do ligante asfáltico (g/cm³);

G_{se} = massa específica efetiva (g/cm³);

G_{sb} = massa específica aparente (g/cm³).

4.8 Ligante asfáltico efetivo em mistura asfáltica

É a quantidade de ligante asfáltico adicionada à mistura menos o volume de ligante asfáltico absorvido. Determinado pela equação 3:

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100}\right) * P_s \qquad (3)$$

Onde: P_{be} = teor de ligante asfáltico efetivo em relação a massa total da mistura (%)

P_b = teor de ligante asfáltico em relação a massa total da mistura (%)

Ps = massa total de agregado em relação a massa total da mistura (%)

4.9 Massa específica real dos agregados (γr)

É a relação entre a massa do agregado e seu volume, não incluso o volume dos vazios permeáveis a água, (g/cm³). Determinada conforme prescrevem as normas:

a) Agregado graúdo, fração: 4,76 < # < 19,1 mm – norma: DNIT 413/2021 – ME[9].
b) Agregado miúdo, fração: 0,075 < # < 4,76 mm – norma: DNIT 411/2021 – ME[7].

4.10 Massa específica aparente dos agregados (γa)

É a relação entre a massa do agregado e seu volume, incluindo os volumes dos vazios permeáveis a água, (g/cm³). Determinada conforme prescrevem as normas:

a) Agregado graúdo, fração: 4,76 < # < 19,1 mm – norma: DNIT 413/2021 – ME[9].
b) Agregado miúdo, fração: 0,075 < # < 4,76 mm – norma: DNIT 411/2021 – ME[7].

4.11 Absorção de água pelos agregados

Aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento por água de seus poros permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca. Determinada conforme prescreve a normas:

a) Agregado graúdo, fração: 4,76 < # < 19,1 mm – norma: DNIT 413/2021 – ME[9]
b) Agregado miúdo, fração: 0,075 < # < 4,76 mm – norma: DNIT 411/2021 – ME[7]

4.12 Massa específica real do fíler

É a relação entre a massa do fíler e o seu volume, (g/cm³). Determinado conforme preconiza o método de ensaio, DNER - ME 085/1994[13].

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

4.13 Massa específica aparente do agregado total (Gsb)

É a relação entre as frações dos agregados: graúdos, miúdos e fíler e seus respectivos volumes aparentes (vazios permeáveis à água inclusos) (g/cm³), determinada pela equação 4:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_n}{\frac{P_1}{\gamma_{a1}} + \frac{P_2}{\gamma_{a2}} + \cdots + \frac{P_n}{\gamma_{an}}} \qquad (4)$$

Onde: G_{sb} = Massa específica aparente do agregado total (g/cm³)

P_1, P_2 ...P_n = porcentagens em massa dos agregados: 1,2 ...n;

$\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \ldots \gamma_{aN}$ = massa específica aparente dos agregados: 1, 2, ...n.

4.14 Massa específica real do agregado total (Gsa)

É a relação entre as frações dos agregados: graúdos, miúdos e fíler e seus respectivos volumes, com os vazios permeáveis a água não inclusos (g/cm³). Determinada pela equação 5:

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_n}{\frac{P_1}{\gamma_{r1}} + \frac{P_2}{\gamma_{r2}} + \cdots + \frac{P_n}{\gamma_{rn}}} \qquad (5)$$

Onde: G_{sa} = Massa específica real do agregado total (g/cm³)

$\gamma_{r1}, \gamma_{r2}, \ldots \gamma_{rn}$ = massa específica aparente dos agregados: 1, 2, ...n.

4.15 Massa específica efetiva do agregado total (Gse)

É a relação entre as frações dos agregados: graúdos, miúdos e fíler e seus respectivos volumes, considerando que parte dos vazios permeáveis a água são preenchidos por ligante asfáltico (g/cm³), determinada pela equação 6:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \qquad (6)$$

Onde: Pmm = mistura solta total expressa em porcentagem do peso total da mistura (= 100%);

G_{mm} = Massa específica máxima medida em amostras não compactadas (g/cm³);

P_b = porcentagem de ligante asfáltico da massa total da mistura (%);

G_b = massa específica do ligante asfáltico (g/cm³).

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

4.16 Massa específica aparente do corpo de prova compactado (Gmb)

É a relação entre a massa do corpo de prova e o volume total do corpo de prova compactado, com os vazios de ar inclusos (g/cm³), determinadas pelas equações 7, 8 e 9, conforme prescreve o método ensaio DNIT 428/2022 – ME[12].

Para corpos de prova com Vv ≤ 10% e absorção de água ≤ 2%:

$$Gmb = A/(C-B) \qquad (7)$$

Onde: A – massa do corpo de prova seco ao ar (g);

B – massa do corpo de prova imerso em água (g);

C – massa do corpo de prova saturado com a superfície seca ao ar (g);

Para corpos de prova com Vv ≤ 10% e absorção de água > 2%:

$$G_{mb} = \frac{D}{E-F-\frac{E-D}{D_{pa}}} * \gamma_t \qquad (8)$$

Onde: G_{mb} – massa específica aparente do corpo de prova (g/cm³);

D = massa do corpo de prova seco ao ar (g);

E = massa do corpo de prova revestido seco ao ar, expressa em gramas (g);

F = massa do corpo de prova revestido com filme PVC (g);

Dpa = massa específica do filme PVC (g/cm³) e,

γ_t = massa específica da água na temperatura do ensaio (g/cm³).

Para corpos de prova com Vv > 10%:

$$MEa = A/V \qquad (9)$$

Onde: MEa – massa específica aparente do corpo de prova (g/cm³);

A – massa do corpo de prova seco ao ar (g);

V – volume do corpo de prova (cm³).

4.17 Massa específica máxima medida em amostras não compactadas (Gmm)

É a relação entre a massa da mistura asfáltica solta e o seu volume. Pode ser determinada como prescreve a norma DNIT 427/2020-ME [11].

4.18 Diâmetro máximo do agregado (DM)

É definido como sendo o tamanho da menor peneira, da série normal, que permite a passagem de 100% do material.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

4.19 Diâmetro máximo nominal (DMN)

Diâmetro máximo nominal do agregado é definido como o diâmetro da peneira, da série normal, inferior àquela que passa 100% e que retém mais de 10%.

4.20 Superfície específica

Superfície específica dos agregados é a relação entre a área e a massa dos agregados (m²/kg)

4.21 Volume de vazios (Vv)

Define-se como sendo o volume dos espaços vazios do corpo de prova. Determinado pela equação 10:

$$Vv = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \qquad (10)$$

Onde: Vv = volume de vazios (%)

4.22 Vazios do agregado mineral (VAM)

Vazios intragranulares do corpo de prova Marshall compactado que inclui os vazios de ar e o ligante asfáltico efetivo. Determinado pela equação 11:

$$VAM = 100 - \left(\frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}\right) \qquad (11)$$

Onde: VAM = vazios do agregado mineral (%);

Ps = porcentagem do agregado em massa da mistura (%).

4.23 Vazios cheios de Betume (VCA)

Vazios intragranulares do corpo de prova Marshall compactado, preenchido por ligante asfáltico. Determinado pela equação 12:

$$VCA = \frac{(VAM - V_v)}{VAM} * 100 \qquad (12)$$

Onde: VCA = vazios cheios de asfalto (%).

4.24 Relação asfalto/vazios (RAV)

Expressa a relação entre o volume de ligante asfáltico efetivo e o VAM, dado pela equação 13:

$$RAV = \frac{VCA}{VAM} * 100 \qquad (13)$$

Onde: RAV = relação asfalto/vazios (%).

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

4.25 Estabilidade Marshall

Resistência máxima diametral, de mistura asfáltica, quando submetido a um carregamento estático linear em suporte padronizado do corpo de prova Marshall. Expresso em (N)

4.26 Fluência Marshall

Deformação máxima, sofrida pelo corpo de prova para atingir o valor de Estabilidade definido no item 4.25, expresso em (mm).

4.27 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Resistência do corpo de prova Marshall à tração, determinada pela norma NBR 15087/2012[(2)]. Expresso em MPa.

4.28 Dano por umidade induzida (DUI)

Dano por umidade induzida (DUI) determinado pela norma NBR 15617/2015[(3)] - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Expresso em (%).

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

5 APARELHAGEM E MATERIAL

5.1 Aparelhagem

a) Compactador automático Marshall, constituído de base de madeira (elevada densidade) com seção quadrada nas dimensões aproximadas de: 250 mm de largura e 400 mm de altura, placa de aço quadrada fixada sobre o topo da base de madeira com dimensões de cerca de 25 mm de espessura e 300 mm de largura. Guias metálicas fixadas verticalmente a base munida de rolamentos e corrente com pinos de engate que quando acionada por um motor propicia o levantamento do peso do soquete até o limite superior deixando-o peso cair em queda livre. O compactador não deve permitir o repique na compactação e permitir uma velocidade entre 0,8 s e 1,0 s por golpe. Dispor de contador de golpes;

b) Bloco da mesma madeira, revestido com placa de aço nas mesmas dimensões do utilizado no compactador automático Marshal (4.1.1), para ser utilizado na opção de compactação manual dos corpos de prova;

c) Fixador para molde Marshall (compactação manual);

d) Soquete;

e) Molde cilíndrico, colarinho e base;

f) Prensa hidráulica ou manual com capacidade de manter a velocidade do êmbolo de 50 mm/min com carga de 5 t. Sistema de medição de deslocamento da base móvel com precisão em mm (LVDT, relógio comparador ou similar) e dispositivo de medição da carga aplicada com capacidade de 5 t (Célula de carga, anel dinamométrico ou similar);

g) Banho maria com capacidade para 6 corpos de prova;

h) Paquímetro com curso de no mínimo 150 mm (sens. 0,05 mm);

i) Suporte para resistência à tração por compressão diametral;

j) Suporte de estabilidade;

k) Medidor de fluência;

l) Espátula;

m) Panela de ferro ou alumínio com capacidade de 3 l;

n) Chapa elétrica de aquecimento;

o) Fogareiro;

p) Tela aramada revestida por com amianto;

q) Estufa com capacidade de temperatura de 180 ºC;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

r) Conjunto de peneiras em latão nas dimensões de 8” de diâmetro x 2” de altura com as seguintes aberturas em mm: (25,4, 19,1, 15,9, 12,5, 9,54, 4,76, 2,0, 1,2, 059, 0,42, 0,177 e 0,075) e um conjunto de tampa e fundo;

s) Agitador elétrico de peneiras, com “timer” e capacidade para peneiramento, de uma só vez, de uma série normal de peneiras com tampa e fundo;

t) Balança com capacidade mínima de 4 kg sensibilidade e 0,1g com dispositivo para pesagem hidrostática;

u) Bacias plásticas capacidade 3 l;

v) Piceta com capacidade de 250 ml;

w) Bandejas metálicas retangular de dimensões aproximadas de 400 mm de largura x 600 mm de comprimento e 60 mm de altura;

x) Extrator de amostra Marshall manual ou hidráulico;

y) Cesto de tela aramada de 2 mm, munida de alça com capacidade de aproximadamente 3 l;

z) Termômetro bimetálico, escala 0 a 250 ºC sensibilidade 2ºC;

aa) Termômetro de vidro com graduação externa e escala entre 0º e 100ºC graduação de 1ºC ;

bb) Termômetro de vidro com graduação externa e escala entre 0º e 200ºC graduação de 2ºC;

cc) Funil metálico;

dd) Pinça tenaz abertura de 4”;

ee) Colher de metal;

ff) Recipiente com capacidade de 0,5 litros, munido de alça refratária e bico;

gg) Forno NCAT, conforme ME-DE-P00/011[(5)];

5.2 Materiais e reagentes

a) Luvas de klever ou amianto;

b) Papel filtro de 4” de diâmetro;

c) Querosene;

d) Vaselina sólida;

e) Parafina;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

f) Folha de lixa 80 para ferro;

g) Sacos plásticos ;

h) Embalagem de alumínio descartável;

i) Lápis de cera ou giz ou líquido corretivo;

j) Folha de ensaio.

6 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

6.1 Amostras de agregados

As amostras de agregados, fíler, ligantes asfálticos e aditivos utilizadas no projeto de dosagem devem ser as mesmas que serão utilizadas na produção da mistura asfáltica. Se porventura ocorrer a substituição de qualquer material, parte ou integralmente, o projeto de dosagem deve ser descartado e um novo projeto realizado com os novos materiais.

6.2 Massa específica aparente, real e absorção dos agregados: graúdos e miúdos e fíler

Determinar as massas específicas aparente, real e absorção dos agregados conforme as normas:

a) Agregado graúdo, fração: 4,76 < # < 19,1 mm – norma: DNIT 413/2021[9] – ME

b) Agregado miúdo, fração: 0,075 < # < 4,76 mm – norma: DNIT 411/2021[7] – ME

6.3 Granulometria dos agregados

Determinar a distribuição granulométrica dos materiais granulares que irão compor a mistura, conforme prescreve a norma: DNIT – ME 412/2019[8], com lavagem na peneira de abertura 0,075mm.

6.4 Composição granulométrica da mistura asfáltica

a) A composição granulométrica da mistura asfáltica, consiste na adequada combinação entre as proporções de agregados: graúdos, miúdos e fíler, de forma a enquadrá-la dentro dos limites da faixa de especificação técnica.

b) Dependendo das características granulométricas dos materiais constituintes, torna-se necessário a adição de material na fração areia. Caso opte-se pela adição de areia lavada de rio, a porcentagem adicionada não deve exceder a 10% da mistura de agregados.

c) A distribuição granulométrica da mistura asfáltica é o resultado da somatória das porcentagens de cada material multiplicado pelas frações passantes em cada peneira.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

d) Após a obtenção da distribuição granulométrica da mistura asfáltica, determina-se a faixa de trabalho conforme especificação técnica. Caso a distribuição granulométrica da mistura asfáltica esteja próxima dos limites: inferior ou superior da especificação, de forma que a faixa de trabalho se situe fora dos limites da faixa de especificação, a faixa de trabalho deve assumir o limite da faixa de especificação.

6.5 Linha de densificação máxima

a) A linha de densificação máxima é uma relação matemática para verificar os vazios existentes entre os agregados de maior e menor tamanho após a densificação da mistura asfáltica. Essa relação, baseada nas curvas de Fuller, descreve a graduação de densidade máxima, promovendo um mínimo de vazios do agregado mineral (VAM) na mistura.

b) Com escala linear no eixo das abcissas, os gráficos de graduação para os diversos tamanhos de peneiras, utiliza-se a potência de 0,45, conforme recomendação *Federal Highway Administration – FHWA (Robert et. Al., 1996).*

c) Uma característica importante do gráfico obtido é que ele atribui um zero teórico ao tamanho da peneira. Consequentemente, em termos práticos, as linhas de densificação máxima, (linhas retas) são plotadas a partir da origem, onde se dá a intersecção entre os eixos (zero por cento passante x zero teórico do tamanho da peneira). Estas retas finalizam-se no ponto correspondente ao diâmetro máximo nominal – (DMN) dos agregados na potência de 0,45.

É recomendado que a distribuição granulométrica obtida no item 6.4 apresente-se paralela a linha de densificação máxima correspondente. O cruzamento dessa linha pela distribuição granulométrica testada para peneiras de maior tamanho, pode implicar em problemas de segregação da mistura asfáltica em pista.

6.6 Massa de agregados por corpo de prova

A altura dos corpos de prova de mistura asfáltica após a moldagem deve ser de 63,5 mm com tolerância de +/- 1,3 mm. É recomendado que a massa de agregados e fíler que irão compor cada corpo de prova seja obtida com as equações 14 para concreto asfáltico e 15 para pré misturado a quente, determinadas com base na massa específica aparente do agregado total (Gsb), item 4.13.

$$P = 270{,}054 * G_{sb} + 421 \qquad (14)$$

$$P = 318{,}14 * G_{sb} + 184 \qquad (15)$$

Onde: P = massa de agregados para moldagem dos corpos de prova Marshall para obtenção da altura do corpo de prova de mistura asfáltica com 63,5 +/- 1,3 mm.

6.7 Fracionamento dos agregados para composição da massa do corpo de prova

a) É recomendado para a composição das porções de agregados e fíler de cada corpo de prova, que seja feita somando-se as frações correspondente a cada peneira que compõem a granulometria da mistura asfáltica conforme item 6.4. Assim, é necessário que os agregados que irão compor a mistura asfáltica, sejam fracionados peneira a peneira.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

b) Como sugestão para composição das massas dos corpos de prova, fracionar os agregados: brita 1, pedrisco e pó de pedra nas frações indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Sugestão de fracionamento dos agregados

	Frações # (mm)
1	19,1 > # > 15,9
2	15,9 > # > 12,5
3	12,5 < # < 9,52
4	9,52 < # < 4,76
5	4,76 < # < 2,00
6	# < 2,00

c) Com base na distribuição granulométrica da composição da mistura asfáltica (item 6.4) determinar as porcentagens correspondentes a cada fração, sugerida na tabela 1, e compor a massa de agregados dos corpos de prova conforme equação 14 ou 15.

6.8 Massa de agregado e fíler por corpos de prova

a) Com a porcentagens de cada fração descrita no item 6.7 alínea b, compor, dependendo do tipo de mistura asfáltica a ser ensaiada, vinte porções com a massa de agregado e fíler (M_a) obtida com as equações 14 ou 15.

b) Determinar os teores de ± 0,5% e ± 1,0% em relação ao teor ótimo de ligante asfáltico de projeto estimado corrigido (equação 1).

c) Da mesma forma descrita no item 6.8 alínea a, compor cinco porções de massas de 1.500 g cada, para a determinação da massa específica máxima teórica Gmm.

6.9 Preparo e compactação dos corpos de prova

Nessa norma é facultado a moldagem dos corpos de prova Marshall, manualmente ou com emprego de compactadores automáticos, desde que observado o uso do cepo de madeira, conforme descrito no item 5.1 alínea b, no caso da opção da moldagem manual.

a) Colocar as porções de agregados e fíler em vasilhas metálicas ou embalagens de alumínio para aquecimento. Devem ser mantidos em estufa, por no mínimo 4 h de 10ºC a 15ºC acima da temperatura de usinagem do ligante asfáltico.

b) Aquecer os moldes metálicos, os colarinhos, a base fixa do molde e também a base do soquete Marshall.

c) O ligante asfáltico deve ser aquecido, preferencialmente em estufa, na temperatura de usinagem. Caso o aquecimento seja realizado em uma fonte de calor tipo fogareiro, evitar o superaquecimento do ligante asfáltico em contato direto com a chama do fogareiro, revolvendo constantemente o ligante.

d) A massa de ligante asfáltico adicionada é função dos teores obtidos no item 6.6 e é determinada pela equação 16:

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

$$M_l = \frac{P_b * M_a}{100 - P_b} \qquad (16)$$

Onde: M_l = massa de ligante asfáltico (g)

M_a = massa de agregado da mistura asfáltica (g)

Nota: Antes do início da preparação das misturas asfálticas, preparar uma porção de mistura asfáltica, no teor ótimo de ligante asfáltico estimado, determinado conforme item 4.6. Essa mistura tem por finalidade manter uma película de ligante asfáltico na panela metálica de misturação, de forma a não alterar o teor de ligante asfáltico no preparo da primeira mistura.

e) Retirar a porção de agregados e fíler da estufa e colocá-los dentro da panela metálica (com uma película de ligante asfáltico) previamente aquecida e revolver com uma espátula. Em seguida, abrir um buraco no centro dos agregados, expondo o fundo da panela (local para despejar o ligante asfáltico aquecido) e posicionar a bacia com os agregados sobre a balança. Zerar a balança e despejar a massa de ligante (M_l) correspondente ao teor desejado, obtido na equação 16, dentro do buraco. Eventual excesso de ligante despejado, remover com auxílio de uma folha de papel.

f) Posicionar a panela sobre uma fonte de calor (chapa aquecida ou fogareiro) e revolver energicamente a mistura (mantendo a bacia sobre a fonte de calor) de forma que todos os agregados estejam recobertos pelo ligante asfáltico.

g) Em seguida, despejar a mistura asfáltica dentro de uma bacia metálica ou embalagem de alumínio descartável, identificar e colocar em estufa à temperatura de compactação por 2 h para o período de digestão.

h) Untar a parede interna do molde metálico aquecido com uma fina camada de vaselina. Posicionar sobre a base metálica do compactador: a base fixa juntamente com o molde metálico, o colarinho e o funil metálico, colocar um disso de papel filtro no interior do molde. Retirar da estufa a mistura asfáltica usinada, despejar na panela previamente aquecida e novamente misturar com a colher metálica.

i) Como forma de evitar a segregação da mistura no corpo de prova Marshall, não se deve despejar a mistura asfáltica dentro do molde metálico e sim, colocá-la com auxílio da colher metálica. Em seguida, com a espátula, aplicar 15 golpes no perímetro e 10 golpes no centro da mistura. Colocar um disco de papel filtro no topo da mistura, posicionar o soquete (com a base aquecida) a iniciar a compactação com 75 golpes por face do corpo de prova:

- Compactação automática: fixar a manopla do soquete na parte superior do aparelho compactador, zerar o contador de golpes e inicial a compactação. Após a aplicação de 75 golpes, retirar o soquete e virar o corpo de prova. Com auxílio de um martelo e um pedaço de madeira golpear a borda do molde de forma que esse desça até encostar na base fixa do molde. Posicionar o soquete sobre a amostra e aplicar mais 75 golpes.
- Manual (são necessários dois operadores): um operador segura com uma das mãos a manopla do soquete e com a outra golpeia o corpo de prova, o segundo operador

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

gira o molde a cada golpe. Após a aplicação de 75 golpes, inverte o molde e aplica-se a segunda série de 75 golpes. Normalmente, cada série de 75 golpes por corpo de prova é aplicada por um operador.

j) Após a compactação, os moldes com os corpos de prova compactados são identificados e posicionados sobre a geratriz do molde para resfriamento. Pode-se também posicionar sobre a base do corpo de prova, nesse caso, a base deve estar apoiada sobre um disco de forma que o corpo de prova fique totalmente apoiado.

k) Para a extração dos corpos de prova dos moldes é recomendado que seja feita após 24 h. Primeiramente, os moldes devem ser colocados em estufa para um prévio aquecimento, até atingir a temperatura tal que seja possível o contato com as mãos sem que se queime. Extrair os corpos de prova com auxílio do extrator de amostras.

l) Para a determinação da Gmm, preparar a porção de 1500 g de mistura asfáltica conforme descritos nos itens 5.7 alíneas d e e.

m) Após o período de digestão, retirar a mistura da estufa e despejar em uma bandeja metálica deixando-a esfriar até temperatura ambiente. Em seguida, destorroar a mistura o máximo possível e fazer o ensaio de Gmm conforme descreve a norma DNIT 427/2020 - ME[11].

n) Traçar um gráfico ortogonal de eixos lineares, onde no eixo das abcissas são plotados os teores de ligante asfáltico adicionado e no eixo das ordenadas as respectivas massas específicas máximas medidas, (Gmm). A plotagem assemelha-se, necessariamente, a uma reta. Traçar uma reta e obter a equação por regressão linear e determinar através dessa regressão, os valores das massas específicas máxima medidas (Gmm), para cada teor de ligante asfáltico adicionado.

7 VOLUMETRIA DOS CORPOS DE PROVA COMPACTADOS

Preencher a folha de ensaio com identificando dos corpos de prova e os respectivos teores de ligante asfáltico adicionado.

Com uma lixa de ferro de gramatura 100, lixar levemente os corpos de prova para remoção de partículas soltas, principalmente, das quinas.

Medir com auxílio do paquímetro o diâmetro de cada corpo de prova em quatro posições diametralmente opostas e medir a altura, também de cada corpo de prova em quatro posições opostas e registrar na folha de ensaio.

Realizar a pesagem hidrostática de cada corpo de prova conforme descreve a norma DNIT 428/2022 - ME[12] e anotar na folha de ensaio: a massa ao ar, massa imersa e massa com superfície seca saturada.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

7.1 Parâmetros Marshall

Determinar os parâmetros Gmb, equações 7, 8 e 9 e o Gmm descritas no item 4.16.

7.1.1. Volume de vazios

Obter os volumes de vazios para cada corpo de prova, equação 10, item 4.21.

7.1.2. VAM

Determinar os vazios do agregado mineral através da equação 11 item 4.22.

7.1.3. VCA

Determinar a porcentagem de vazios cheios de asfalto com a equação 12, item 4.23.

7.1.4. RAV

Determinar a relação entre asfalto e vazios do corpo de prova com a equação 13, item 4.24.

7.1.5. Estabilidade

Colocar 2 corpos de prova de cada teor de ligante asfáltico no banho maria a temperatura de 60ºC por um período de no mínimo 30 minutos e no máximo 40 minutos.

Colocar um corpo de prova no dispositivo de estabilidade Marshall, que deve estar pré-aquecido com temperatura ligeiramente acima da temperatura ambiente, com o local onde o corpo de prova for assentado limpo e com os pinos guias lubrificados.

Colocar o dispositivo de estabilidade Marshall no prato da prensa e posicionar o medidor de fluência no pino guia e zerar a escala.

Acionar a prensa de forma a manter uma velocidade de avanço do prato de 50 mm/min. Registrar na folha de ensaio a máxima carga (estabilidade) que o corpo de prova apresentou no ensaio.

7.1.6. Fluência

Na realização do ensaio de estabilidade, medir a fluência (deformação) que o corpo de prova apresentou para a máxima carga.

7.1.7. Resistência à tração por compressão diametral

Com os dois corpos de prova remanescentes de cada teor de ligante asfáltico, submetê-los ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) conforme descreve o método de ensaio NBR 15087/2012[(2)].

7.1.8. Dano por Umidade Induzida (DUI)

Após a determinação do teor ótimo de ligante asfáltico de projeto, determinar a efetividade da adesividade do ligante asfáltico/agregado com o ensaio de DUI conforme prescreve a norma NBR 15617/2015[(3)].

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

A mistura asfáltica deve atender a especificação quanto a relação de resistência à tração (RRT). A não conformidade implica, necessariamente, na execução de uma nova dosagem de mistura asfáltica, com adição de novo teor de cal CH-I ou adição de dope ao ligante asfáltico ou mesmo a substituição do mesmo.

8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS (GRÁFICOS) E ENSAIO MODELO

A apresentação dos resultados é feita em forma de gráficos com os parâmetros: Gmb, volume de vazios, VAM, VCA, RAV, estabilidade, fluência e Resistência à tração por compressão diametral, em função dos teores de ligante asfáltico adicionados.

Após a determinação do teor de ligante asfáltico de projeto como descreve (Exemplo ET-DE-P00/027[(6)]), preencher a Tabela 2 com os valores dos parâmetros acima descrito e incluir os parâmetros, Gmm, resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e relação fíler/asfalto, referentes ao teor ótimo de ligante asfáltico de projeto.

Tabela 2 - Modelo de apresentação do resumo dos resultados da dosagem Marshall

Parâmetro	Unidade	Valor	Especificação ET- DE-P00/027 [(6)]
Teor ótimo de ligante asfáltico de projeto (% em massa)	%		
Massa específica aparente (Gmb)	g/cm³		
Massa específica máxima medida (Gmm)	g/cm³		
Volume de vazios (Vv)	%		
Vazios do agregado mineral (VAM)	%		
Relação asfalto vazios (RAV)	%		
Vazios cheios de asfalto (VCA)	%		
Estabilidade Marshall	kgf		
Fluência	mm		
Resistência à tração por compressão diametral (RT)	MPa		
Dano por umidade induzida (DUI) (condicionamento severo)	%		
Relação fíler/asfalto	-o-		

Na tabela 3 está apresentado um modelo contendo os teores de agregados definidos na dosagem e na Figura 1, um modelo de forma de apresentação dos gráficos dos parâmetros Marshall.

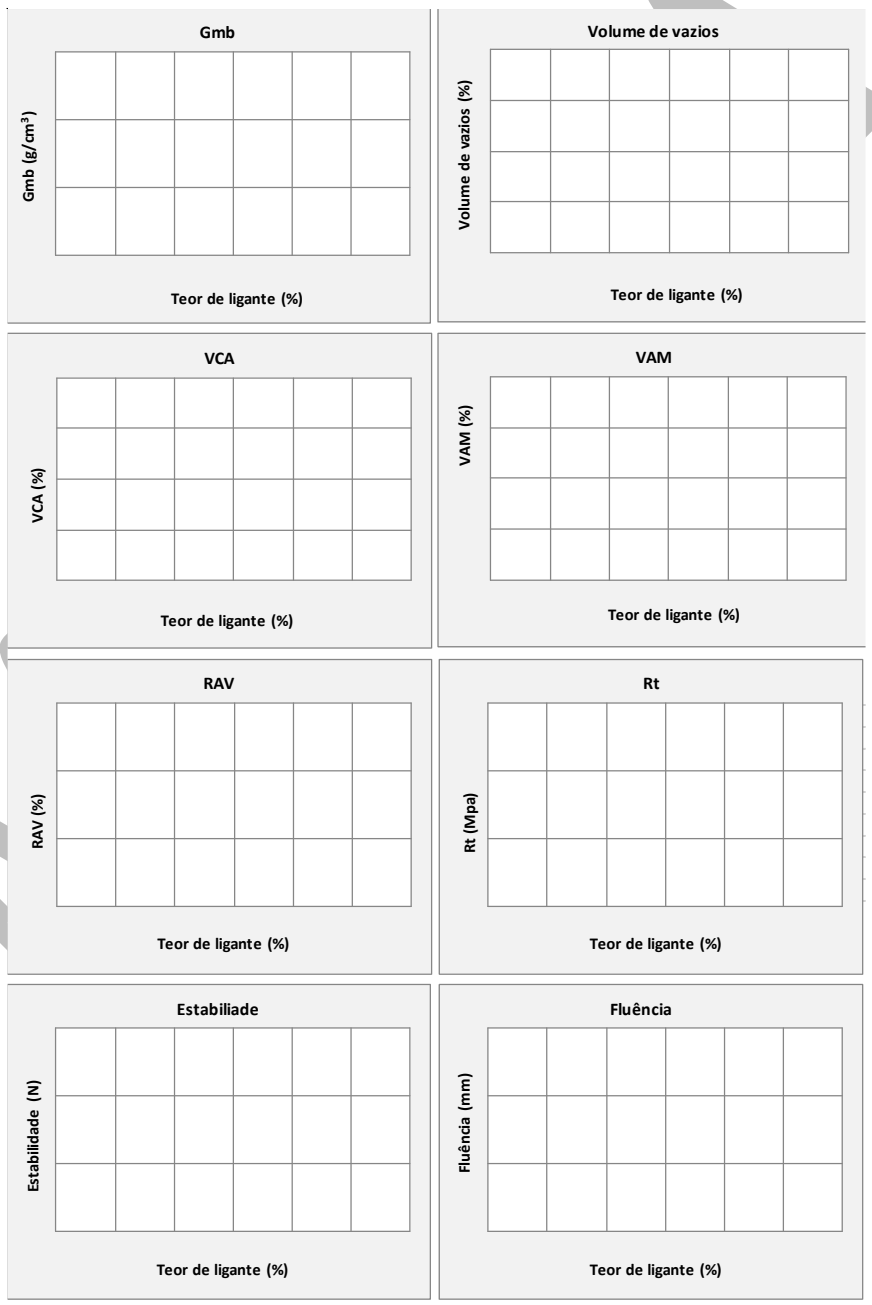
MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela 3 - Modelo de apresentação dos teores de agregados definidos na dosagem

Material	Procedência	% em massa na mistura de agregados
Brita 1		
Pedrisco		
Pó de pedra		
Cal hidratada CH-I		

Figura 1 – Modelo de apresentação dos parâmetros Marshall



Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

9 CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DO TEOR ASFÁLTICO ÓTIMO DE PROJETO

A determinação do teor ótimo de ligante asfáltico de projeto deve atender os limites da especificação técnica, adotando a sequência dos seguintes parâmetros: VAM, volume de vazios, RAV e a resistência à tração por compressão diametral.

Determinar o teor de ligante asfáltico correspondente ao menor valor do parâmetro VAM, sendo esse teor, o limite superior e o inferior, correspondente a no máximo 0,5%. O menor valor do VAM deve atender ao limite especificação técnica.

Determinar os volumes de vazios correspondentes a essa faixa de teor de ligante asfáltico e verificar se corresponde aos limites da especificação técnica.

Da mesma forma, proceder com os demais parâmetros. O teor de ligante asfáltico de projeto será o teor que satisfazer o enquadramento de todos os parâmetros.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12052**. Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

2. ____. **NBR 15087**. Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.

3. ____. **NBR 15617**. Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.

4. ____. **NBR 16974**. Agregados - Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2022.

5. DEPERTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO – **ME-DE-P00/011** - Determinação do Teor de Asfalto por Meio do Forno NCAT (Ignition Method). São Paulo. 2023

6. DEPERTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO – **ET-DE-P00-027**- Concreto Asfáltico. São Paulo. 2023

7. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT **411/2021 - ME**. Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas – Método de ensaio. Brasília, 2021.

8. ____. **DNIT 412/2019** - ME. Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento - Método de ensaio. Brasília, 2019.

9. ____. **DNIT 413/2021** – ME. Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas para misturas – Método de ensaio. Brasília, 2021.

10. ____. **DNIT 425/2022** - ME. Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio– Método de ensaio. Brasília, 2020.

11. ___. **DNIT 427/2020** - ME. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Brasília, 2020.

12. ____. **DNIT 428/2022** - ME. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova – Método de ensaio. Brasília, 2022.

13. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **DNER ME 085**. Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

14. ____. **DNER-ME 089.** Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.