



MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES,
PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL

DEPARTAMENTO NACIONAL DE IN-
FRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

DIRETORIA GERAL

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E
PESQUISA

INSTITUTO DE PESQUISAS
RODOVIÁRIAS

Rodovia Presidente Dutra, km 163
Centro Rodoviário – Vigário Geral
Rio de Janeiro/RJ – CEP 21240-000
E-mail: ipr@dnit.gov.br

Novembro/2017

NORMA DNIT xxx/2017 - PRO

Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento

Autor: Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR

Processo: 50607.002843/2017-46

Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na Reunião de / / .

Direitos autorais exclusivos do DNIT, sendo permitida reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte (DNIT), mantido o texto original e não acrescentado nenhum tipo de propaganda comercial.

Palavras-chave:

Preparação, corpo de prova, giratório, Marshall, Superpave

Total de páginas

19

Resumo

Este procedimento estabelece as condições de preparação e compactação de misturas asfálticas de laboratório ou de usina visando obter corpos de prova padronizados, para avaliação das suas características volumétricas e mecânicas. Aplica-se a dois procedimentos de compactação: giratório e de impacto (Marshall). Aspectos ligados aos equipamentos principais de aplicação da energia de compactação diferem nos dois tipos de equipamentos e são definidos individualmente. Utensílios e equipamentos auxiliares e as características da preparação das amostras são iguais para os dois equipamentos.

Abstract

This procedure establishes the conditions for the preparation and compaction of laboratory or plant asphalt mixtures in order to obtain standardized test specimens for evaluation of their volumetric and mechanical characteristics. Applies to two compaction procedures: gyratory and impact (Marshall). Aspects related to the main equipment of application of the compaction energy differ in the two types of equipment and are defined individually. Auxiliary equipment and sample preparation characteristics are the same for both equipment.

Sumário

Prefácio	1
1 Objetivo	2
2 Referências normativas	2
3 Definições	2
4 Aparelhagem	4
5 Amostra	5
6 Determinação da densidade do corpo de prova compactado	8
7 Relatório dos resultados	8
Anexo A (Normativo) - Figuras	9
Anexo B (Informativo) - Figuras	14
Anexo C (Informativo)	17
Anexo D (Informativo) - Bibliografia	18
Índice geral	19

Prefácio

A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DPP, para servir de documento base, visando estabelecer os procedimentos para preparação de corpos de prova de mistura asfáltica para dosagem e ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o compactador Marshall.

A criação desta norma procede dos estudos e pesquisas realizados no âmbito do Termo de Execução Descentra-

lizada – TED nº 682/2014 firmado com a COPPE/UFRJ, para o desenvolvimento de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimento asfáltico. Está formatada em conformidade com a norma DNIT 001/2009 – PRO.

1 Objetivo

Esta norma descreve os procedimentos para a preparação e compactação de corpos de prova cilíndricos de mistura asfáltica a quente usando o compactador giratório Superpave (preferencialmente) ou o compactador Marshall (alternativa somente para alguns ensaios). O molde de 100 mm de diâmetro pode ser utilizado para mistura com agregados de dimensão máxima nominal de 25 mm. Os corpos de prova podem ser usados para ensaios mecânicos diversos no projeto de dosagem da mistura asfáltica e na avaliação e controle das misturas asfálticas produzidas em usina.

O compactador giratório propicia a formação de uma estrutura do esqueleto pétreo mais próximo do que se obtém no campo, com os procedimentos de compactação típicos de uma obra de pavimentação. Por isto, deve ser usado preferencialmente, tanto na dosagem quanto na preparação de corpos de prova, para os ensaios mecânicos.

NOTA: Se o ligante for o asfalto-borracha o equipamento Marshall é o mais indicado.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta norma. Para referências datadas aplicam-se somente as edições citadas; para referências não datadas aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (inclusive emendas):

- a) NBR 14950 – Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol.
- b) NBR 15184 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.
- c) NBR 15573 - Determinação da massa específica aparente de corpos de prova.
- d) NBR 15619 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas.

3 Definições

Para os fins desta norma aplicam-se as definições a seguir:

3.1 Superpave

Sigla correspondente a Superior PERFORMANCE Asphalt PAVEMENTS (Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) correspondente a uma série de métodos desenvolvidos no *Strategic Highway Research Program* (SHRP – Programa Estratégico de pesquisas rodoviárias).

3.2 Procedimento Superpave

Método de preparação de corpos de prova por compactação em equipamento próprio denominado compactador giratório.

3.3 Procedimento Marshall

Método de preparação de corpos de prova por compactação em equipamento próprio denominado compactador Marshall.

3.4 Energia de compactação por amassamento

Tipo de compactação onde a energia é aplicada à amostra por uma pressão estática, com movimento continuado do volume da mistura asfáltica por giros do molde.

3.5 Energia de compactação por impacto

Tipo de compactação onde a energia é aplicada à amostra por pressão dinâmica (impacto) provocada pela queda de um peso sobre toda a área superficial da mistura asfáltica dentro do molde. No compactador Marshall a base (ou sapata) que recebe o impacto do peso tem a mesma dimensão do diâmetro interno do molde, com uma ligeira folga.

3.6 Estrutura do esqueleto mineral

Consiste no arranjo dos agregados presentes na mistura asfáltica, que varia com o tipo de compactação e dimensões das partículas e do molde.

3.7 Intertravamento

Forma de arranjo dos grãos pétreos, que corresponde ao melhor ajuste e maior contato entre os agregados que compõem o esqueleto mineral da mistura asfáltica.

3.8 Vazios do agregado mineral

Volume de vazios nos agregados minerais (VAM), que representa o que não é agregado numa mistura, ou seja, vazios com ar e asfalto.

3.9 Vazios do corpo de prova

Vazios na mistura total, ou vazios de ar na mistura asfáltica compactada, comumente chamado de Volume de Vazios – Vv.

3.10 Grau de compactação

Relação entre a densidade aparente de um corpo de prova de laboratório, ou de pista, e a densidade aparente de projeto.

3.11 Número de giros

Quantidade estabelecida de rotações do molde no compactador giratório, que representa a energia necessária para atingir certo arranjo do esqueleto mineral. O número de giros se correlaciona com a energia de compactação e com o volume de tráfego previsto para a via.

3.12 Nível de giros

Definem-se três níveis de giro particulares no método de dosagem Superpave: número inicial (Nini), número de projeto (Np) e número máximo (Nmax), correlacionados a Vv específicos.

3.13 Ângulo de inclinação

No método de compactação denominado giratório, estabeleceu-se um ângulo de inclinação da base de apoio que permite a variação da atuação da energia sobre a massa a ser compactada por meio de giros da base.

3.14 Mistura preparada e compactada em laboratório

Amostra preparada no laboratório por pesagem de cada componente, misturados, formando uma massa homo-

gênea, submetida à compactação depois de duas horas de condicionamento à temperatura de compactação (ou após tempo especificado pelo projetista), usando um equipamento de compactação de laboratório.

3.15 Mistura preparada em usina e compactada em laboratório

É a amostra de mistura asfáltica produzida em uma usina (planta de produção), coletada antes da compactação e imediatamente compactada usando um equipamento de compactação de laboratório.

3.16 Mistura reaquecida compactada em laboratório

Amostra de mistura asfáltica produzida em uma usina (planta de produção), coletada antes da compactação, resfriada até a temperatura ambiente e reaquecida em estufa de laboratório e compactada, usando um equipamento de compactação de laboratório. Este procedimento deve ser utilizado somente em estudos especiais e não deve ser utilizado para misturas asfálticas com asfalto-borracha e misturas com uso de cal.

3.17 Condicionamento de curto prazo de misturas a quente

É o procedimento de condicionamento de mistura de curto prazo usado para simular o envelhecimento que ocorre durante a construção e deve ser usado no projeto da mistura e na preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos

NOTA: A amostra preparada no laboratório tem propriedades diferentes de mistura produzida em usina por várias razões. Uma dessas é que há envelhecimento à medida que a mistura passa pela planta e durante o armazenamento e transporte. Também reage com o oxigênio do ar, torna-se mais dura e perde voláteis nas altas temperaturas durante a construção. A absorção de parte do ligante pelo agregado também pode ocorrer enquanto o aglutinante ainda é fluido o suficiente para migrar para os poros do agregado. O envelhecimento continua a uma taxa mais lenta ao longo da vida útil do pavimento, mais alta em climas quentes ou durante os meses de verão, quando as temperaturas são maiores. É importante contabilizar as mudanças nas propriedades da mistura ao preparar

misturas no laboratório. Uma maneira é fazer um condicionamento, de forma a simular o envelhecimento que ocorre durante a usinagem, transporte e a execução do serviço.

4 Aparelhagem

Esta seção está dividida em quatro subseções, conforme discriminação seguinte:

- Equipamentos correspondentes ao procedimento de compactação giratório (Superpave);
- Equipamentos correspondentes ao procedimento de compactação de impacto (Marshall);
- Equipamentos auxiliares na preparação da amostra e sua caracterização física;
- Outros instrumentos auxiliares e materiais diversos.

4.1 Equipamento giratório (Superpave)

a) Compactador: dispositivo eletromecânico, eletro-hidráulico ou eletropneumático composto de componentes: (1) estrutura de reação, base rotativa e motor; (2) sistema de carregamento, cilindro de carga, e medidor de pressão; (3) sistema de registro de dados de altura e número de giros; e (4) cilindro de moldagem do corpo de prova e placa base (Figura A1, do Anexo A).

b) Estrutura de reação: pórtico rígido, que permite a compressão da massa asfáltica pelo cilindro de carga durante a compactação do corpo de prova. Mancais são usados para posicionar a base rotativa num ângulo externo de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$, correspondente a um ângulo interno de $1,16^\circ$, mantendo-o fixo durante o processo de giros estabelecidos para aplicar a energia desejada (Figura A2). A base rotativa deve permitir que o cilindro que contém o corpo de prova gire livremente em seu eixo inclinado durante a compactação.

c) Motor elétrico: aciona a base rotativa a uma velocidade constante de $30 \pm 0,5$ rpm. O eixo do compactador deve permitir que o cilindro que contém a mistura asfáltica gire livremente em seu eixo inclinado durante a compactação.

d) Sistema hidráulico ou pneumático: aplica uma pressão vertical constante de compactação de 600 ± 60 kPa ao corpo de prova durante os primeiros cinco giros e de 600 ± 18 kPa durante o restante do processo de compactação. A calibração do sistema deve ser realizada de acordo com instruções do fabricante do equipamento. O eixo do atuador de carga deve ser perpendicular à placa

do compactador.

NOTA: No caso de rede pneumática, para o bom funcionamento do equipamento é importante ter um sistema eficiente de secagem do ar comprimido que alimenta o equipamento.

e) Sistema de aquisição de dados: registra continuamente as medidas de altura do corpo de prova durante o processo de compactação, com precisão de 0,1 mm, uma vez por giro (Figura A3).

f) Moldes de compactação:

- i. Cilindro de aço, com espessura mínima de 7,5 mm de parede, diâmetro interno de 149,90 mm a 150,00 mm e altura mínima de 250 mm, usual para a moldagem de corpos de prova para a dosagem Superpave da mistura asfáltica. (Figura A4 do Anexo A);
- ii. Cilindro de aço, com espessura mínima de 7,5 mm de parede, diâmetro interno de 99,90 a 100,00 mm e altura mínima de 250 mm, para moldagem de corpos de prova para os ensaios mecânicos (Anexo A – Figura A4);
- iii. Placa do molde e atuador de carga: fabricada em aço, plana, com diâmetro externo de 149,50 mm a 149,75 mm, para o molde de 150 mm de diâmetro interno, ou com diâmetro externo de 99,50 a 99,75 mm, para o molde de 100 mm de diâmetro interno.

O equipamento deve ser calibrado de acordo com as recomendações do fabricante, quanto ao ângulo, pressão, altura e velocidade de rotação, a cada 100 horas de uso ou anualmente, ou quando se observam ocorrências fora do comum, tais como: vibrações, ruídos ou travamento do sistema. As dimensões do molde e da placa devem ser verificadas anualmente. É necessário um ajuste no equipamento sempre que se troca o diâmetro do corpo de prova.

4.2 Equipamento de impacto (Marshall)

a) Molde de compactação: cilindros de aço que se encaixam, composto de anéis superior (colarinho) e inferior (molde do corpo de prova) e placa de base, conforme detalhado na Figura A5 (Anexo A). A placa de base e o anel superior devem se encaixar perfeitamente no anel inferior. A placa de base funciona como um suporte para centralizar o molde. O operador deve colocar o molde de compactação, colarinho e placa de base na posição adequada, antes da compactação do corpo de prova;

b) Base ou pedestal de compactação: constituída por uma peça de madeira dura, de boa qualidade, de seção transversal quadrada de 200 mm por 200 mm e aproximadamente 450 mm de altura, nivelada no seu topo com uma placa de aço de, aproximadamente, 300 mm por 300 mm e 25,4 mm de espessura. A peça de madeira deve ser seca e com massa específica aparente de 670 kg/m³ a 770 kg/m³. A madeira deve ser fixada por quatro parafusos em um bloco de concreto de cimento Portland, de dimensões de 450 mm por 450 mm e altura de 225 mm. A peça de aço deve ser firmemente fixada. A montagem da base deve ser realizada de modo a que placa esteja em nível, livre de trepidação e vibração (Figura A5, do Anexo A);

c) Soquete de compactação: constituído de uma massa de 4540 ± 1 g, que cai em queda livre de uma altura de 457,2 ± 1,5 mm, com uma base plana, circular, que tem um elemento amortecedor tipo mola no interior. O soquete pode ter utilização manual ou mecânica. Na Figura A6 é mostrado um aparelho para utilização mecânica do soquete. O soquete de compactação manual deve ter um protetor de dedo;

d) Extrator de corpo de prova: composto por um disco de aço de até 100 mm de diâmetro e 12,5 mm de espessura, usado para extrair corpo de prova compactados dos moldes, com alavanca que garanta que o corpo de prova não seja deformado durante o processo de extração (Figura A6).

4.3 Equipamentos auxiliares

a) Estufas ou placas aquecedoras: Podem ser utilizadas estufas com circulação de ar (preferencialmente), de vários tamanhos, panela com controle termostático ou placa aquecedora, para aquecer agregados, materiais asfálticos, moldes e outros equipamentos a temperaturas de até 3,0 °C acima das correspondentes de mistura e compactação especificadas;

b) Equipamentos para mistura: recomendado misturador mecânico de qualquer tipo, que mantenha a massa asfáltica na temperatura de mistura especificada durante o tempo requerido, produzindo uma mistura homogênea (Anexo A - Figura A8). Quando em pequenas quantidades, pode ser usado um recipiente metálico, com capacidade adequada para produzir a mistura manualmente sobre uma placa aquecedora (Figura A7, do Anexo A).

4.4 Instrumentos e materiais diversos

- a) Recipientes para aquecer agregados: bandejas metálicas ou recipientes descartáveis de alumínio;
- b) Recipientes para aquecer os ligantes asfálticos: lata, bêquer de alumínio ou panela com bico vertedor;
- c) Utensílios para preparar a mistura: espátula de aço (com ponta arredondada), colher de metal com cabo longo ou concha;
- d) Termômetros calibrados, para determinar as temperaturas dos agregados, materiais e misturas asfálticas. São recomendados termômetros de vidro ou digitais com haste de metal com graduação de 10,0 °C a 200,0 °C com resolução de 3,0 °C;
- e) Balança, com capacidade mínima de 5.000 g e resolução de 1 g;
- f) Luvas, para manuseio e transporte de produtos quentes;
- g) Máscara protetora facial contra gases e vapores orgânicos e inorgânicos;
- h) Giz de cera, ou pincel e tinta resistente ao calor, para identificar corpos de prova;
- i) Bastão de vidro ou metálico, ou espátula com lâmina flexível em aço com cabo de madeira, para homogeneizar o ligante asfáltico;
- j) Concha funda, para misturar os agregados;
- k) Colher de metal grande, para colocar a mistura dentro do molde do corpo de prova;
- l) Paquímetro, de tamanho adequado para medir diâmetro e altura dos corpos de prova.

5 Amostra

5.1 Preparação dos agregados

Secar os agregados até constância de massa em estufa a temperatura de 105,0 °C a 110,0 °C. Após esfriar, separar os agregados por peneiramento seco nas frações desejadas, recomendadas as seguintes frações: 25 mm a 19 mm (1" a 3/4"); 19 mm a 12,5 mm (3/4" a 1/2"); 12,5 mm a 9,5 mm (1/2" a 3/8"); 9,5 mm a 4,75 mm (3/8" a n° 4); 4,75 mm a 2,0 mm (n° 4 a n° 10) e < 2,0 mm (passando na n° 10).

Caso esteja previsto o uso de cal ou cimento como parte do *filler* da mistura, estes componentes também devem ser pesados e adicionados aos agregados minerais.

5.2 Temperaturas do ligante asfáltico para a mistura e compactação

O ligante deve ser aquecido, de modo a apresentar viscosidades de $(0,17 \pm 0,02)$ Pa.s ou (85 ± 10) SSF para mistura e $(0,28 \pm 0,03)$ Pa.s ou (140 ± 15) SSF para compactação, determinadas segundo as normas ABNT NBR 15184:2004 ou ABNT NBR 14950:2003.

NOTA 1: Essas faixas de viscosidades para seleção de temperaturas de mistura e compactação podem não ser adequadas para ligantes asfálticos modificados. O fabricante do ligante asfáltico modificado deve fornecer indicação das faixas apropriadas de temperaturas de mistura e compactação.

NOTA 2: No caso de uso de melhorador de adesividade ou produtos de misturas mornas, estes devem ser acrescentados ao ligante asfáltico aquecido ou de acordo com as instruções dos fabricantes.

5.3 Preparação da mistura em laboratório

A mistura deve ser preparada às bateladas, com volume e massa suficientes para a moldagem de um ou vários corpos de prova, dependendo da capacidade do misturador:

- a) Pesar em recipientes separados a quantidade de cada fração de agregados necessária para produzir uma quantidade para um ou múltiplos corpos de prova, de acordo com a capacidade do misturador. Colocar os recipientes com agregados sobre uma placa aquecida, ou numa estufa, e aquecer a uma temperatura maior do que a temperatura de mistura estabelecida na subseção 5.2, sem excedê-la em mais de $10,0$ °C. A massa conhecida de agregados é usada para o cálculo da quantidade de ligante asfáltico a ser acrescentado;
- b) A massa necessária de agregados e ligante para cada corpo de prova depende do tamanho pretendido, em função do diâmetro do molde e da altura final necessária para cada finalidade de ensaio e deve ser definida previamente. Como regra geral, para um corpo de prova de 100 mm de diâmetro e 60 mm de altura é necessário cerca de 1200 g de mistura asfáltica; para diâmetro de 100 mm e altura de 170 mm, são cerca de 2800 g e para 150 mm de diâmetro e 100 mm de altura, cerca de 4600 g aproximadamente;
- c) Em seguida, aquecer o recipiente de mistura e todos

os utensílios a temperatura requerida;

d) Depois, colocar no recipiente de mistura o agregado aquecido e misturá-lo a seco por aproximadamente 5 segundos. No caso de mistura manual, deve-se formar uma depressão no centro do agregado seco misturado e verter o ligante asfáltico, pesando a quantidade necessária para cada condição previamente definida, na temperatura de mistura. No caso de misturador mecânico, o ligante deve ser introduzido conforme a instrução do fabricante. Deve-se evitar a perda de mistura durante o processo de mistura e manuseio. A temperatura da mistura deve estar de acordo com os limites estabelecidos na subseção 5.2. Na sequência, misturar o agregado e o ligante asfáltico rapidamente até a cobertura completa do agregado por aproximadamente 60 segundos, para a produção de um único corpo de prova, e por aproximadamente 120 segundos, para a produção de múltiplos corpos de prova;

e) Após o processo completo de mistura, colocar a mistura solta em um recipiente metálico numa estufa na temperatura de compactação ± 3 °C, por um período de 2 horas ± 10 minutos, denominado período de condicionamento de curto prazo. Mexer a mistura depois de 60 ± 5 minutos, para manter o condicionamento uniforme;

f) No caso de bateladas múltiplas, deve-se colocar a amostra total sobre uma superfície limpa e não absorvente. Misturar manualmente, para garantir uniformidade, e quartear em amostras de tamanhos apropriados para a confecção de cada corpo de prova. Após, colocar essas amostras em recipientes metálicos em estufas a temperatura de compactação ± 3 °C por um período de 2 horas ± 5 minutos, denominado período de condicionamento de curto prazo. Mexer a mistura depois de 60 ± 5 min, para manter o condicionamento uniforme;

NOTA: O aquecimento da mistura asfáltica por um período de tempo anterior à compactação (condicionamento) resulta em corpo de prova com propriedades diferentes de corpo de prova compactados imediatamente após mistura. Os critérios do método de dosagem Marshall original são baseados em procedimentos sem condicionamento. Porém, para a preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos o condicionamento de curto prazo deve ser empregado.

g) Por fim, colocar o molde em uma estufa à temperatura de compactação estabelecida ± 5 °C pelo menos 45

minutos antes da compactação do primeiro corpo de prova (durante o período em que a mistura está no processo de condicionamento descrito na alínea “e” desta subseção).

5.4 Compactação de mistura produzida em usina

5.4.1 Misturas asfálticas coletadas em pista antes da compactação: misturas asfálticas recém usinadas podem ser, eventualmente, para estudos específicos, reaquecidas em laboratório em recipientes cobertos, em estufas a temperaturas correspondentes à de compactação $\pm 3,0$ °C. O aquecimento deve durar apenas o tempo necessário para atingir a temperatura de compactação;

5.4.2 Amostras de misturas a quente produzidas em usinas e compactadas na própria usina: deve ser especificada uma das seguintes condições de envelhecimento de curto prazo - (a) nenhum condicionamento, compactar imediatamente após a produção; (b) condicionamento de acordo com a subseção 5.3; e (c) outro tipo de condicionamento a critério do projetista.

5.5 Compactação dos corpos de prova

5.5.1 Ao término do período de condicionamento, devem ser retirados da estufa o recipiente com a mistura solta e o molde de compactação. Recomenda-se colocar um disco de papel dentro do molde, para facilitar a separação do corpo de prova da placa da base, após a compactação;

5.5.2 Colocar rapidamente a mistura dentro do molde, usando uma concha e funil. Tomar cuidado para minimizar a segregação da mistura no molde. Após a mistura ter sido colocada completamente no molde, ajeitar a mistura com uma espátula aquecida, de 10 a 15 vezes em volta do perímetro e no interior, e em seguida colocar um disco de papel em cima da mistura para evitar a aderência do atuador de carga, soquete ou da placa;

5.5.3 Em seguida, colocar o molde de compactação dentro do compactador giratório ou sobre a base de compactação Marshall e iniciar o processo de compactação, segundo os critérios de energia de cada equipamento e de acordo com os procedimentos descritos a seguir:

5.5.3.1 Compactação com equipamento giratório

- a) Aplicar a pressão vertical de $600 \text{ kPa} \pm 18 \text{ kPa}$, induzir o ângulo de inclinação e iniciar a compactação por amassamento, com a energia estipulada por número de giros especificado. A compactação deve prosseguir até se atingir o número de giros especificado para determinação de propriedades volumétricas, ou atingir uma altura especificada. O equipamento desliga quando se atinge o critério estabelecido de parada. Deve-se coletar os dados de medidas de altura do corpo de prova a cada giro, por meio digital;
- b) Remover o ângulo do conjunto do molde; retirar o cilindro de carga; remover o molde do compactador; extrair o corpo de prova do molde imediatamente;
- c) Remover os discos de papel das partes superior e inferior do corpo de prova.

NOTA 1: Antes de reutilizar o molde, coloque-o na estufa por um período de 5 minutos. O uso de vários moldes acelera o processo de compactação.

NOTA 2: para alguns ensaios mecânicos o corpo de prova precisa estar com um volume de vazios específico. Nesse caso, deve-se alterar o número de giros usado para o projeto, para se atingir esta condição. É ainda possível considerar uma altura padrão a ser atingida durante a compactação giratória.

5.5.3.2 Compactação com equipamento Marshall

- a) Aplica-se o número estabelecido de golpes com o soquete de compactação especificado, a uma frequência de 64 ± 4 golpes por minuto. Em seguida, remover a placa de base e o colarinho, invertendo a posição do molde, e reinstalar o conjunto de peças do molde de compactação. Depois, aplicar o mesmo número de golpes com o soquete de compactação. O número de golpes (impacto) do soquete pode ser de 50 ou 75 impactos por face, em função do tipo de mistura asfáltica e do tráfego.
- b) Quando a compactação for realizada manualmente, deve-se manter a haste do soquete de compactação o mais perpendicular possível em relação à placa de base do molde de compactação durante a compactação e verificar sempre o ritmo dos golpes, para manter o padrão equivalente do soquete mecânico.
- c) Antes de extrair o corpo de prova do molde, deixar o corpo de prova esfriar por algumas horas, com o conjunto

pousado sobre uma superfície plana, para evitar danos.

6 Determinação da densidade do corpo de prova compactado

6.1 Procedimentos após a compactação

Após a compactação e extração do molde, com o corpo de prova à temperatura ambiente, devem ser realizados os procedimentos seguintes:

6.1.1 Registrar a altura e o diâmetro do corpo de prova, com precisão de 0,1 mm;

6.1.2 Determinar a massa do corpo de prova extraído do molde, com precisão de 0,1 g. Determinar a densidade máxima específica do corpo de prova extraído do molde, de acordo com o método de ensaio prescrito na norma ABNT NBR 15573:2012.

6.1.3 Determinar a densidade máxima teórica da mistura solta, conforme método de ensaio prescrito na norma ABNT NBR 15619:2016, usando uma amostra de referência, condicionada às mesmas condições do corpo de prova compactado.

6.2 Cálculo das densidades parciais durante a compactação giratória

6.2.1 Determinar a densidade relativa corrigida pela Equação (1):

$$C_n = \frac{G_{mb} \cdot h_m}{G_{mm} \cdot h_n} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

C_n = densidade relativa corrigida em qualquer giro - n, durante o processo de compactação, expressa como uma porcentagem da densidade máxima teórica;

G_{mb} = massa específica aparente do corpo de prova extraído;

G_{mm} = densidade máxima teórica da mistura (amostra de referência);

h_m = altura do corpo de prova registrado no giro final, mm; e

h_n = altura do corpo de prova registrado em qualquer giro durante o processo de compactação, mm.

NOTA: A densidade relativa calculada em qualquer giro (n) usando a Equação (1) é uma aproximação. Devido à variabilidade inerente nos agregados, como também na mistura asfáltica dos corpos de prova, a densidade relativa de um corpo de prova moldado usando os mesmos materiais, número de giros (n), pode não corresponder exatamente à densidade relativa calculada usando a Equação (1).

6.2.2 Quando a preparação do corpo de prova no compactador giratório se destinar a fase de dosagem deve-se utilizar a análise da curva de densidade versus número de giros, para definição das propriedades volumétricas (N_{proj}) e parâmetros da qualidade da mistura quanto à trabalhabilidade (N_{ini}) e a tendência a problemas de fluência ou deformação permanente ($N_{máx}$).

7 Relatório dos resultados

O relatório dos resultados deve incluir, também, as seguintes informações:

- Identificação do corpo de prova (número, mistura de laboratório ou mistura em usina, reaquecido ou não);
- Tipo de ligante asfáltico, procedência e teor na mistura;
- Tipo(s) de agregados, origem e granulometria;
- Tipo e período de condicionamento prévio à compactação;
- Tipo de compactador usado (giratório, Marshall mecânico ou manual);
- Temperatura de compactação;
- Energia de compactação (N° de giros ou N° de golpes);
- Temperatura da Mistura e da compactação;
- Quando o corpo de prova for moldado no compactador giratório por critério de altura, registrar a altura com aproximação de 0,1mm após cada giro e relatar o número de giros final.

NOTA: O estabelecimento de características de precisão não é aplicável a este método. Os corpos de prova devem ser aceitos ou rejeitados para ensaios posteriores à moldagem, com base nas especificações dos critérios aplicáveis nesses ensaios diretamente.

Anexo A (Normativo)



Figura A1 – Exemplos de modelos de compactador giratório Superpave

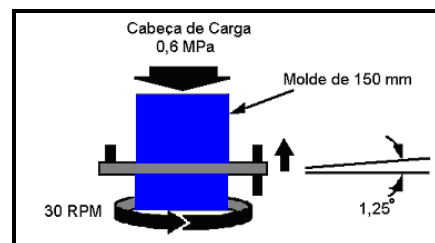
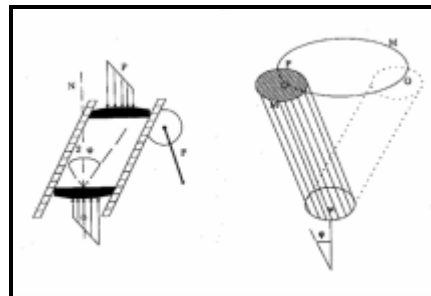
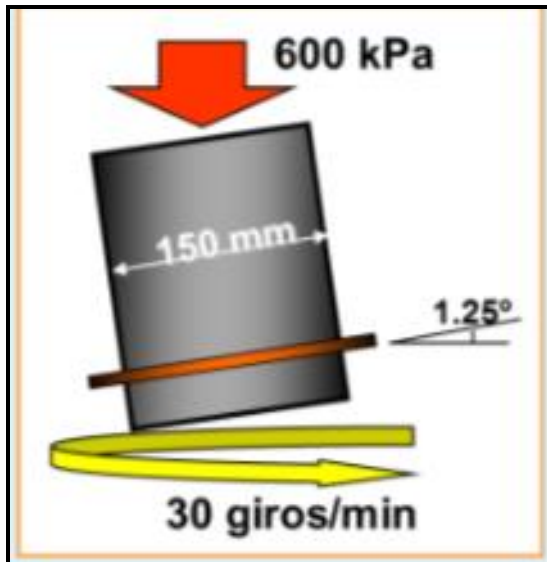
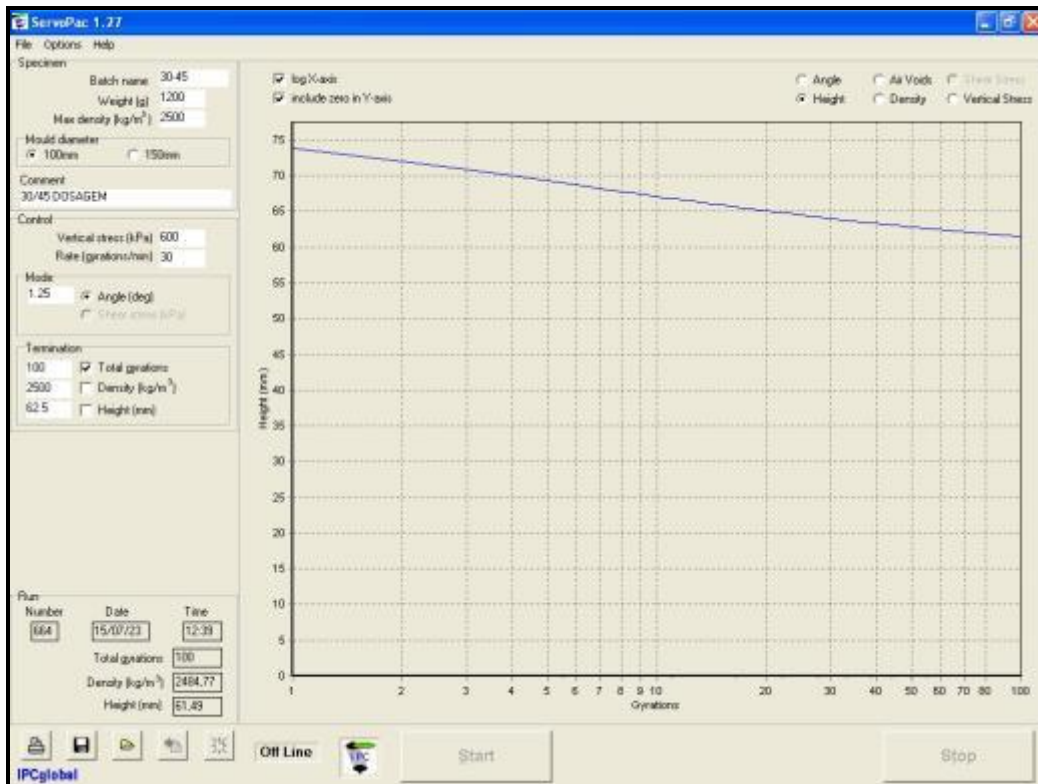
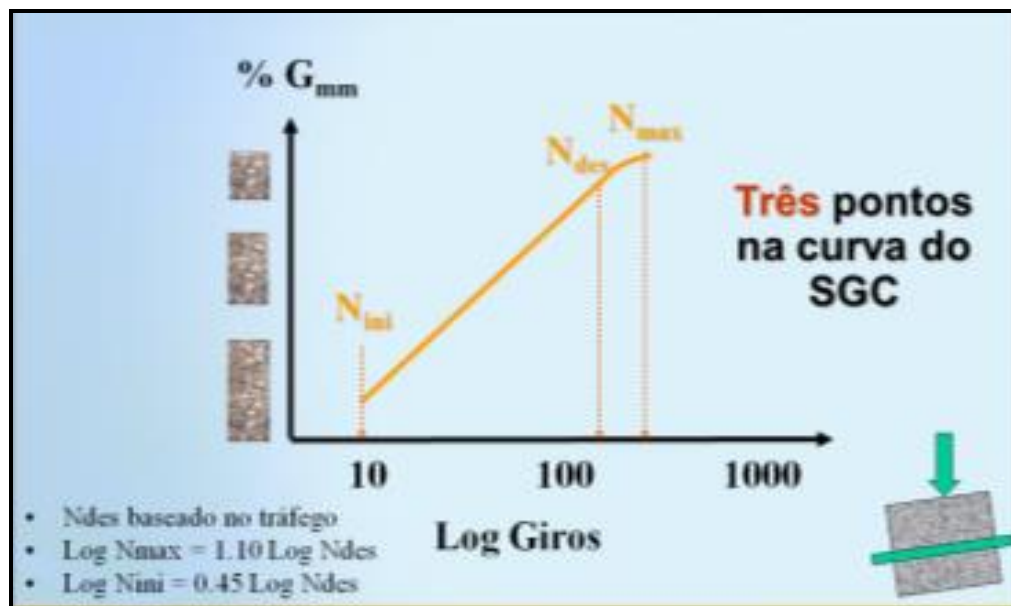


Figura A2 – Esquema do molde e do giro do compactador giratório.



(a) sistema de aquisição de dados – exemplo da tela do programa



(b) esquema do gráfico de densificação.

Figura A3 – Compactador Giratório: (a) sistema de aquisição de dados e (b) gráfico de densificação.



Figura A4 – Moldes do equipamento giratório (150 mm e 100 mm de diâmetro)



Base do molde, molde e colarinho



Soquete manual e molde montado



Molde montado, base de madeira e soquete manual



Esquema da compactação manual

Figura A5 – Equipamento Marshall manual e moldes



Figura A6 - Equipamento Marshall mecânico e extratora de corpo de prova Marshall



Figura A7 – Exemplo de placa aquecedora



Figura A8 – Exemplos de misturadores mecânicos com controle de aquecimento.

Anexo B (Informativo)



Aquecimento da massa asfáltica em estufa



Aquecimento do molde em estufa



Colocação de funil no molde no compactador



Colocação da massa no funil



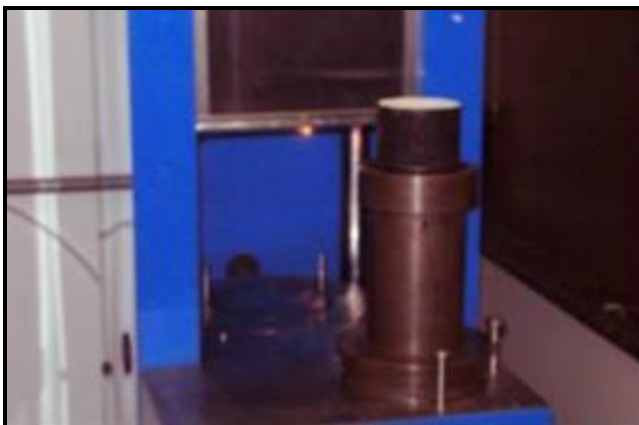
Molde sendo colocado no compactador



Molde e atuador de carga vertical



Compactador fechado com molde dentro



Extração do corpo de prova ao final dos giros



Retirada do papel filtro

Figura B1 – Passos da moldagem com o compactador giratório



Adição do ligante aos agregados aquecidos



Mistura dos componentes



Colocação da mistura no molde



Compactação

Figura B2 – Passos da mistura manual e moldagem no compactador Marshall mecânico



Numeração dos corpos de prova



Medida da altura



Medida do diâmetro



Pesagem do corpo de prova ao ar e superfície saturada e seca



Pesagem do corpo de prova submerso

Figura B3 – Passos de atividades após moldagem do corpo de prova

Anexo C (Informativo)

Número de giros comumente utilizados no compactador giratório

Os três estágios de número de giros, necessários para observar as características de compactação dos corpos de prova que serão utilizados para determinar as propriedades volumétricas da mistura asfáltica, são baseados principalmente no tráfego de projeto conforme indica a Tabela 1.

Para moldar corpos de prova para ensaios mecânicos a referência é o $N_{projeto}$, mas pode variar quando se deseja produzir corpos de prova com diferentes teores de vazios, a partir de uma dosagem prévia, considerando outros parâmetros.

TABELA 1 - Critérios de Compactação usando o Compactador Giratório Superpave

Volume de tráfego comercial	Parâmetros de Compactação Número de giros		
	N_{ini}	$N_{projeto}$	N_{max}
Muito baixo	6	50	75
Médio	7	75	115
Pesado	8	100	160
Muito pesado	9	125	205

/Anexo D

Anexo D (Informativo) - Bibliografia

a) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *PP 48 (2005)*: Standard practice for evaluation of the superpave gyratory internal angle of gyration single user digital publication. Washington, D.C., 2005.

b) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15785*: Misturas asfálticas a quente – Utilização de aparelhagem Marshall para preparação de corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações.

Rio de Janeiro, 2010.

c) _____. *NBR 15897*: Misturas asfálticas a quente – Preparação de corpos-de-prova com compactador giratório Superpave. Rio de Janeiro, 2010.

d) BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *DNER-ME 043/95*: Misturas betuminosas a quente – ensaio: Método de ensaio. Marshall. Rio de Janeiro: IPR, 1995.

_____/Índice geral

Índice geral

Abstract		1	Índice geral		19
Amostra	5	5	Intertravamento	3.7	3
Anexo A (normativo) – Figuras		9	Mistura preparada e compactada em laboratório	3.14	3
Anexo B (informativo) – Figuras		14	Mistura preparada em usina e compactada em laboratório	3.15	3
Anexo C (informativo)		17	Mistura reaquecida compactada em laboratório	3.16	3
Anexo D (informativo) – Bibliografia		18	Nível de giros	3.12	3
Ângulo de inclinação	3.13	3	Número de giros	3.11	3
Aparelhagem	4	4	Objetivo	1	2
Cálculo das densidades parciais durante a compactação giratória	6.2	8	Prefácio		1
Compactação de mistura produzida em usina	5.4	7	Preparação da mistura em laboratório	5.3	6
Compactação dos corpos de prova	5.5	7	Preparação dos agregados	5.1	5
Condicionamento de curto prazo de misturas a quente	3.17	3	Procedimento Marshall	3.3	2
Definições	3	2	Procedimento Superpave	3.2	2
Determinação da densidade do corpo de prova compactado	6	8	Procedimentos após a compactação	6.1	8
Energia de compactação por amassamento	3.4	2	Referências normativas	2	2
Energia de compactação por impacto	3.5	2	Relatório dos resultados	7	8
Equipamento de impacto (Marshall)	4.2	4	Resumo		1
Equipamento giratório (Superpave)	4.1	4	Sumário		1
Equipamentos auxiliares	4.3	5	Superpave	3.1	2
Estrutura do esqueleto mineral	3.6	2	Temperaturas do ligante asfáltico para a mistura e compactação	5.2	6
Grau de compactação	3.10	3	Vazios do agregado mineral	3.8	3
Instrumentos e materiais diversos	4.4	5	Vazios do corpo de prova	3.9	3