

				Código ME-ECS.000.000-PAV/02		REV. 02	
				Emissão 10/07/2025		Folha 1/08	
Rodovia: Geral				Resp. Técnico / Elaborador: Eng. Douglas Mocelin			
Trecho: Geral				N° CREA: RS215709			
				Verificador: Eng. Claudio Renato Castro Dias			
				Aprovador: Eng. Danilo Pitta			
Objeto: MISTURAS ASFÁTICAS - PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DE CONCRETO ASFÁTICO RECICLADO							
Documentos de Referência: ABNT NBR 16273 – Misturas asfálticas – Propriedades volumétricas de concreto asfáltico.							
Descrição das Revisões: Rev.02 – Atualizado no item 4, quanto à legenda da formula: $Pb_{disponível} = Pb_{total} - Pb_{RAP} \times (1 - RBA_{RAP})$ de “ Pb_{RAP} = ligante asfáltico total presente no RAP” para “ Pb_{RAP} = ligante asfáltico total presente no RAP, em termos de peso da mistura (teor de ligante do RAP x teor de RAP na mistura)”. Rev.01 – Atualizado metodologia e cálculos no método de ensaio. Rev.00 – Emitida primeira versão do documento.							
Observação:							

02	10/07/2025	Eng. Douglas Mocelin	RS215709	Eng. Cláudio Renato Castro Dias	Eng. Danilo Pitta
01	06/03/2025	Eng. Douglas Mocelin	RS215709	Eng. Cláudio Renato Castro Dias	Eng. Danilo Pitta
00	04/12/2023	Eng. Reginaldo Jesus	SP-5070904250	Eng. Cláudio Renato Castro Dias	Eng. Danilo Pitta
Rev.	Data	Resp. Técnico/ Elaborador	Nº. CREA	Verificador	Aprovador

1. OBJETIVO

Este método estabelece e define as propriedades volumétricas das misturas asfálticas densas para concreto asfáltico com adição de RAP em sua composição, e seus cálculos.

2. DEFINIÇÕES

Para fins deste método é adotada as seguintes definições:

2.1. Volume de vazios (V_v)

Razão expressa, em porcentagem, entre o volume de ar intergranular disperso na mistura asfáltica compactada (V_a) e o volume total da mistura asfáltica compactada (V_{mb}).

2.2. Vazios no agregado mineral (V_{am})

Razão expressa, em porcentagem, entre o volume de ar intergranular disperso na mistura asfáltica compactada (V_a), acrescido ao volume do ligante asfáltico disponível na mistura (V_{be}), e o volume total da mistura asfáltica compactada (V_{mb}).

2.3. Relação betume vazios (R_{bv})

Razão expressa, em porcentagem, entre o volume do ligante asfáltico disponível na mistura (V_{bd}) e o vazio no agregado mineral (V_{am}).

2.4. Teor de ligante asfáltico da mistura asfáltica (P_{be})

Razão expressa, em porcentagem, entre a massa de ligante asfáltico total adicionado na mistura asfáltica e a massa total da mistura asfáltica.

2.5. Teor de ligante asfáltico absorvido pelo agregado (P_{ba})

Razão expressa, em porcentagem, entre a massa de ligante asfáltico absorvida pelo agregado e a massa total dos agregados.

2.6. Teor de ligante asfáltico disponível (P_{be})

Razão expressa, em porcentagem, entre a massa de ligante asfáltico total adicionada na mistura asfáltica menos a quantidade de ligante absorvida pelos agregados e a massa total da mistura asfáltica.

Porcentagem da mistura de RAP multiplicado pelo Teor de ligante do RAP

multiplicado pela disponibilidade.

2.7. Densidade real da mistura dos agregados (G_{sa})

Adimensional, obtida através de cálculo específico

2.8. Densidade real do agregado An (G_{san})

Adimensional, obtida através de cálculo específico

2.9. Densidade aparente da mistura dos agregados (G_{sb})

Adimensional, obtida através de cálculo específico

2.10. Densidade aparente do agregado An (G_{sbn})

Adimensional, obtida através de cálculo específico

2.11. Densidade do ligante asfáltico (G_b)

Adimensional, obtida conforme ABNT NBR 6296

2.12. Densidade efetiva da mistura dos agregados (G_{se})

Adimensional, obtida através de cálculo específico

2.13. Densidade aparente da mistura asfáltica compactada (G_{mb})

Adimensional, medida com superfície saturada seca, conforme ABNT NBR 15573

2.14. Massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (M_{ea})

Medida com superfície saturada seca, conforme ABNT NBR 15573, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3)

2.15. Densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta (G_{mm})

Adimensional, para o volume de vazios (V_v) igual a zero

2.16. Densidade aparente de projeto da mistura asfáltica compactada (G_p)

Adimensional

2.17. Grau de compactação da mistura asfáltica compactada (G_c)

Razão, expressa em porcentagem, entre a densidade aparente do corpo de prova moldado ou extraído da pista e a densidade aparente do projeto da mistura asfáltica compactada

3. REFERÊNCIAS

No preparo deste método foi consultado o seguinte documento:

- ABNT NBR 6296, Produtos betuminosos semisólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa
- ABNT NBR 15573, Misturas asfálticas – Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos-de-prova compactados
- ABNT NBR 15619, Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas
- ASTM C 127, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate
- ASTM C 128, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate
- Mocelin, Douglas Martins. Understanding and Addressing the Role of RAP and RAS in Asphalt Mixture Design and Performance, 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - North Carolina State University, NCSU, EUA 2023.
- M 323, Superpave Volumetric Mix Design
- R 35, Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures
- ASTM D 854, Standard test method for specific gravity of soils

4. CÁLCULOS

A metodologia de cálculos de parâmetros volumétricos presente nesta especificação leva em consideração o método AAMD (*availability adjusted mix design*), desenvolvido por Mocelin (2023). Neste método, primeiramente se considera a porcentagem de ligante presente no RAP que estará disponível para misturar com o ligante virgem na mistura asfáltica, descontando a parcela de ligante reciclado indisponível. O método de determinação da porcentagem de ligante disponível no RAP é descrito na ET-ECS.000.000-PAV/26 – PAVIMENTAÇÃO – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO EM USINA A QUENTE. Como parte do ligante do RAP estará indisponível, esta parcela indisponível deve

ser considerada como agregado (*black rock*) na composição da mistura, alterando as propriedades volumétricas tanto em termos de teor de ligante, quanto em termos de densidades.

O cálculo revisado das propriedades volumétricas das misturas contendo RAP são demonstrados a seguir.

Primeiramente, a porcentagem de agregados na mistura (P_s) deve ser revisada de acordo com a seguinte equação:

$$P_{s \text{ revisado}} = 100 - P_{b \text{ disponível}}$$

$P_{b \text{ disponível}}$ = ligante asfáltico total disponível na mistura asfáltica, calculado a partir da equação a seguir.

$$P_{b \text{ disponível}} = P_{b \text{ total}} - P_{b \text{ RAP}} \times (1 - RBA_{\text{RAP}})$$

$P_{b \text{ disponível}}$ = ligante asfáltico total disponível na mistura asfáltica;

$P_{b \text{ total}}$ = porcentagem total de ligante asfáltico na mistura, incluindo o ligante virgem e o ligante reciclado;

$P_{b \text{ RAP}}$ = ligante asfáltico total presente no RAP, em termos de peso da mistura (teor de ligante do RAP x teor de RAP na mistura);

RBA_{RAP} = disponibilidade do ligante do RAP, expresso em porcentagem.

A porcentagem de ligante asfáltico indisponível é dada pela seguinte equação.

$$P_{b \text{ indisponível}} = P_{b \text{ RAP}} \times (1 - RBA_{\text{RAP}})$$

O cálculo das densidades também deve ser alterado em função da disponibilidade parcial do ligante reciclado. O ligante indisponível deve ser incluído como parte do volume de agregados e, portanto, da densidade dos agregados. A densidade aparente dos agregados (G_{sb}) é revisada conforme equação a seguir.

$$G_{sb \text{ revisada}} = \frac{P_1 + \dots + P_n + P_{\text{RAP}} + P_{b \text{ indisponível}}}{\frac{P_1}{G_{sb1}} + \dots + \frac{P_n}{G_{sbn}} + \frac{P_{\text{RAP}}}{G_{se\text{RAP}}} + \frac{P_{b \text{ indisponível}}}{G_{b \text{ RAP}}}}$$

$G_{sb\ revisada}$ = densidade aparente dos agregados;

P_1 = porcentagem de agregados da fração 1;

P_n = porcentagem de agregados da fração n ;

$G_{sb\ 1}$ = densidade aparente dos agregados da fração 1;

$G_{sb\ n}$ = densidade aparente dos agregados da fração n ;

P_{RAP} = porcentagem de RAP;

$G_{se\ RAP}$ = densidade efetiva do RAP, retrocalculado da G_{mm} obtida pelo método *Rice*, conforme NBR 15619;

$P_{b\ indisponível}$ = porcentagem de ligante indisponível do RAP;

G_b = densidade do ligante do RAP (adotar 1,02).

As equações dos demais parâmetros volumétricos que serão descritas abaixo não sofrem alteração em sua forma, porém é necessária a utilização dos parâmetros revisados conforme equações anteriores descritas neste capítulo.

A densidade efetiva dos agregados (G_{se}) pode ser obtida através da equação a seguir.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\left(\frac{100}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)}$$

P_b = porcentagem total de ligante na mistura;

G_{mm} = densidade máxima medida, obtida pelo método *Rice*, conforme NBR 15619;

G_b = densidade da mistura de ligantes virgens e reciclados na mistura (adotar 1,02).

$$P_{ba} = \frac{100 \times (G_{se} - G_{sb\ revisado}) \times G_b}{G_{sb\ revisado} \times G_{se}}$$

P_{ba} = porcentagem de ligante absorvido pelos agregados;

$$P_{be} = P_{b\ disponível} - \frac{P_{ba} \times (100 - P_{b\ disponível})}{100}$$

P_{be} = porcentagem de ligante efetivo na mistura asfáltica.

$$V_v = 100 \times \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}}$$

V_v = volume de vazios, expresso em porcentagem;

G_{mb} = densidade aparente da mistura asfáltica compactada.

$$V_{am\ disponível} = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s\ revisado}{G_{sb\ revisado}}$$

$V_{am\ disponível}$ = vazios do agregado mineral revisado de acordo com a disponibilidade parcial do ligante do RAP.

$$R_{bv\ disponível} = \frac{V_{am\ disponível} - V_v}{V_{am\ disponível}} \times 100\%$$

$R_{bv\ disponível}$ = relação betume-vazios revisado de acordo com a disponibilidade parcial do ligante do RAP.

$$G_c = \frac{G_{mb}}{G_{mb\ projeto}}$$

G_c = grau de compactação da mistura asfáltica compactada.

Anexo A

Esquemático representativo da composição volumétrica de acordo com as especificações atuais e de acordo com o método AAMD (Mocelin)

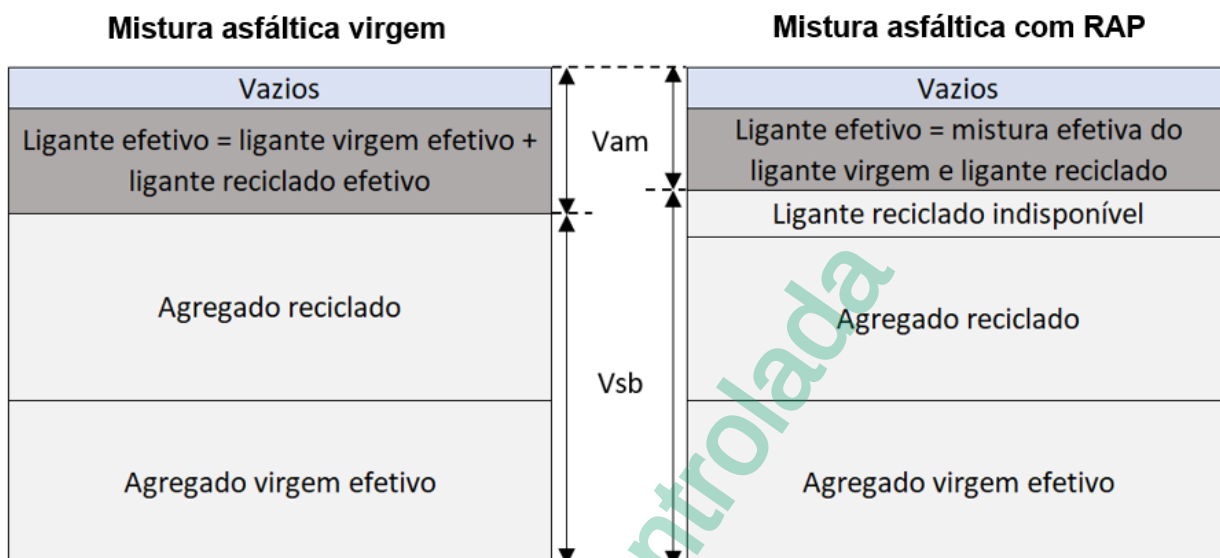


Figura A.1 – Representação dos volumes da mistura compactada

Legenda:

V_{am} = vazios do agregado mineral

V_{sb} = volume dos agregados