



Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia de Transportes

Classificação por desempenho SUPERPAVE - PG

Elaboração:

Prof. Dr. Adalberto Leandro Faxina

Propriedades reológicas e especificações

fim do século 19 e início do século 20

década de 1920 nos Estados Unidos

década de 1980 nos Estados Unidos

desenvolvimento dos primeiros
ensaios de caracterização

lançamento das primeiras
especificações para asfaltos

Programa SHRP*

ASFALTOS PUROS (NÃO-MODIFICADOS)

ASFALTOS PUROS
E
MODIFICADOS

Premissa do SHRP: requisitos válidos para asfaltos puros e modificados

Contexto: somente asfaltos puros eram utilizados

O Programa SHRP introduziu novas ferramentas de caracterização reológica dos asfaltos que permitiu a expansão do uso dos asfaltos modificados, com consequências para o próprio futuro da especificação

*Strategic Highway Research Program

Classificação por desempenho - PG

MOTIVAÇÃO

Por que a classificação PG é adequada ao Brasil?

Países pequenos que têm malha rodoviária consolidada – ex. europeus – consomem pequenas quantidades de asfalto, muitas vezes oriundos de um mesmo fornecedor, de maneira que asfaltos com características semelhantes sejam empregados ao longo de anos/décadas, possibilitando aos órgãos rodoviários conhecer detalhadamente seu desempenho – nesse cenário, a classificação por penetração, p. ex., funciona.

Países grandes que ainda não consolidaram sua malha rodoviária demandam grandes quantidades de asfalto, que serão fornecidas por refinarias diferentes ou mesmo importados, de modo que a diversidade de fontes se torna muito grande, além dos blends necessários para produzir os asfaltos – esse é o cenário dos Estados Unidos (onde a especificação Superpave foi desenvolvida) e também o cenário do Brasil.

Ou seja, a especificação Superpave se enquadra perfeitamente a países em que o mercado de asfaltos é complexo (pela variedade de petróleos empregados na produção de asfalto) e com diversidade climática.

Classificação por desempenho - PG

MOTIVAÇÃO

Por que a classificação PG é tecnicamente atrativa?

A classificação PG está fundamentada na lógica de que as características do asfalto são determinantes sobre o desempenho da mistura asfáltica perante os três principais mecanismos de ruptura dos pavimentos: deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento de origem térmica. Ao especificar os asfaltos de maneira racional, se pode controlar melhor o desenvolvimento destes defeitos.

A classificação PG permite uma avaliação pormenorizada das características de asfaltos puros e modificados, destacando as vantagens e desvantagens de cada um para um determinado cenário. No mercado americano, p. ex., o consumo de asfaltos modificados aumentou exponencialmente após a implementação da especificação Superpave. Especificamente em relação ao mercado de asfaltos modificados brasileiro, a classificação PG pode ajudar na formulação de produtos de melhor qualidade.

Os asfaltos brasileiros atendem os requisitos da especificação Superpave?

Sim, há pelos menos dois estudos realizados no âmbito das universidades (EESC-USP e POLI-USP) e financiado por recursos RDT que mostram claramente que os asfaltos brasileiros puros e modificados atendem plenamente aos requisitos da especificação Superpave, o que exige as refinarias e os distribuidores de promover grandes transformações nos processos de produção dos asfaltos.

Caracterização reológica de ligantes asfálticos pós SHRP

- parâmetro de deformação permanente
 - $G^*/\text{sen}\delta > 1,0$ kPa (materiais virgens)
 - $G^*/\text{sen}\delta > 2,2$ kPa (materiais envelhecidos a curto prazo)
- parâmetro de fadiga
 - $G^*.\text{sen}\delta < 5,0$ MPa (materiais envelhecidos a longo prazo)
- controle de fissuras de origem térmica
 - $S[60] < 300$ MPa e $m[60] > 0,3$ (materiais envelhecidos a longo prazo)

Estufa de filme fino rotativo (RTFO)



envelhecimento a curto
prazo de ligantes
asfálticos (volatilização)

temperatura alta atuando
sobre o filme asfáltico
associado à exposição ao
ar por 85 minutos

Vaso pressurizado de envelhecimento (PAV)



envelhecimento a longo prazo do
resíduo envelhecido no RTFO
(oxidação)

temperatura branda atuando sobre o
resíduo asfáltico associado à pressão
(2,1 MPa) na presença de ar sintético
por 20 horas

Dias atuais: emprego de maiores
tempos de ensaio (40, 60 e 80 horas)
[não incluídos no Superpave]

Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 1.0

PG 64-22

máxima temperatura à qual o material pode estar sujeito, de maneira a garantir a rigidez mínima para resistir ao acúmulo de deformação permanente

$G^*/\text{sen}\delta$ (virgem) > 1,0 kPa
 $G^*/\text{sen}\delta$ (RTFOT) > 2,2 kPa

mínima temperatura à qual o material pode estar sujeito, de maneira a garantir a rigidez mínima para resistir ao trincamento de origem térmica

$S(60)$ < 300 MPa
 $m(60)$ > 0,3

Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 1.0



- medir G^* e δ do ligante asfáltico virgem
 - geometria de 25 mm e gap de 1 mm
 - 48, 52, ..., 76, 82°C
- medir G^* e δ do ligante asfáltico envelhecido a curto prazo
 - geometria de 25 mm e gap de 1 mm
 - 48, 52, ..., 76, 82°C
- $G^*/\sin\delta$ material virgem > 1,0 kPa
- $G^*/\sin\delta$ material RTFOT > 2,2 kPa

Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 1.0



- medir $S[60]$ e $m[60]$ dos ligantes asfálticos envelhecidos a longo prazo
 - 0, -6, -12, -18, -24, -30... ($^{\circ}\text{C}$)
- $S[60] < 300 \text{ MPa}$
- $m[60] > 0,3$
- temperatura reportada é a temperatura crítica - 10°C

Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 1.0



- medir G^* e δ do ligante asfáltico envelhecido a longo prazo
 - geometria de 8 mm e gap de 2 mm
 - 40, 34, ..., 16, 10°C
- $G^* \cdot \sin \delta$ material PAV < 5,0 MPa
- a temperatura crítica de fadiga (na qual o parâmetro de fadiga é igual a 5,0 MPa) não aparece na classificação

Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 2.0

PG 64X-22

máxima temperatura à qual o material pode estar sujeito, de maneira a garantir a rigidez mínima para resistir ao acúmulo de deformação permanente
 $G^*/\text{sen}\delta$ (virgem) > 1,0 kPa

nível de tráfego máximo ao qual o material pode estar sujeito, de maneira a garantir um nível mínimo de deformação permanente

mínima temperatura à qual o material pode estar sujeito, de maneira a garantir a rigidez mínima para resistir ao trincamento de origem térmica
 $S(60) < 300$ MPa
 $m(60) > 0,3$

Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 2.0



- medir G^* e δ do ligante asfáltico virgem
 - geometria de 25 mm e gap de 1 mm
 - 48, 52, ..., 70°C
- $G^*/\sin\delta$ material virgem > 1,0 kPa
- o parâmetro $G^*/\sin\delta$ do material envelhecido a curto prazo é substituído por duas propriedades obtidas apenas do material envelhecido a curto prazo:
 - compliância não-recuperável (J_{nr})
 - recuperação percentual (%R)

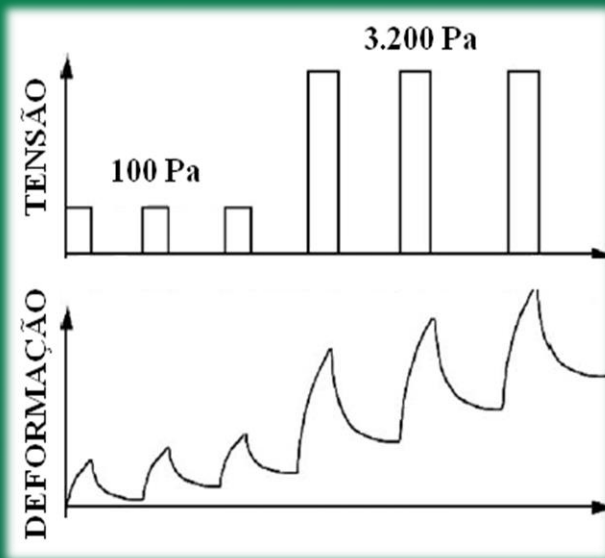
Classificação por desempenho - PG

Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 2.0

- ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR)
 - material envelhecido a curto prazo (RTFO)
 - geometria de 25 mm e gap de 1 mm
 - temperatura do PG do pavimento
 - pulsos de carga/repouso de 1/9 s
 - 100 Pa (20/10) e 3.200 Pa (10/10)
- compliância não-recuperável (J_{nr}) e percentual de recuperação (%R)
- níveis de tráfego associados a valores de J_{nr} (S, V, H e E)
- $(J_{nr3200} - J_{nr100})/J_{nr100} < 0,75$ (limita a sensibilidade a variações bruscas de tensão)

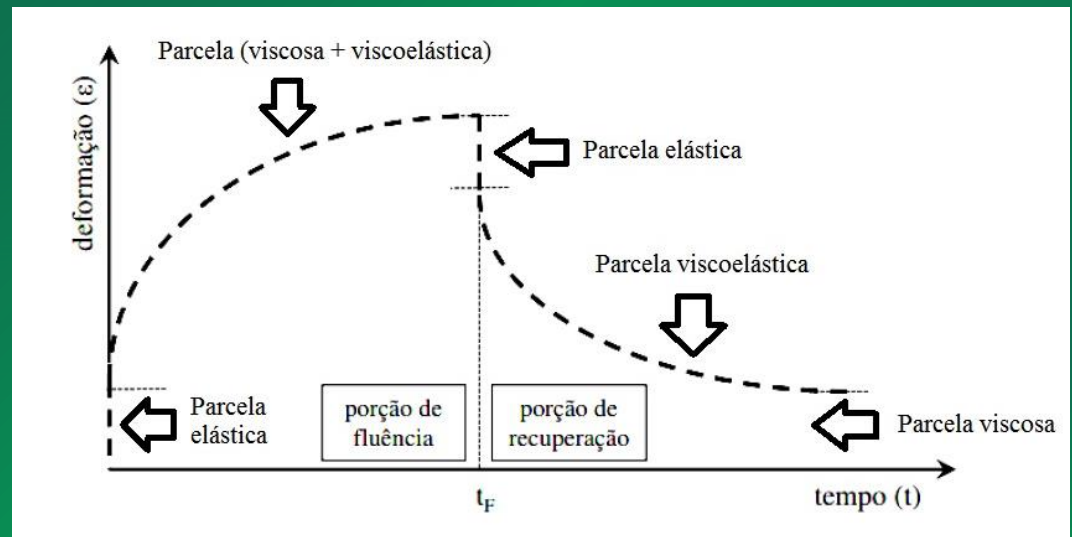
Classificação por desempenho - PG

MSCR



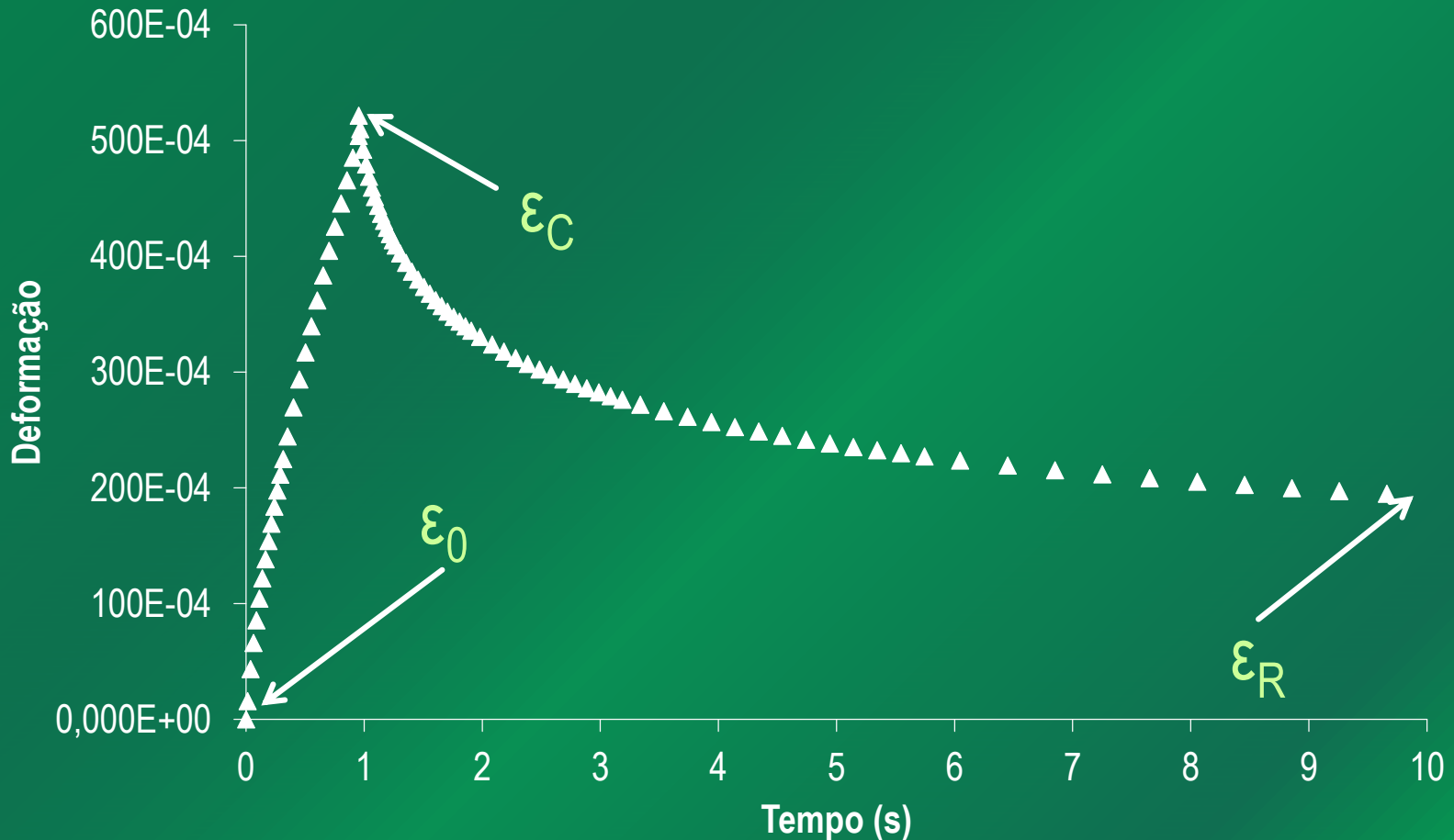
representação (esquemática) da sequência de pulsos de carga aplicados ao material

componentes típicos da deformação total do asfalto no ensaio de *creep* (fluência)



Classificação por desempenho - PG

Deformações características de um pulso de carga no MSCR



Classificação por desempenho - PG

Valores máximos de J_{nr} associados a níveis de tráfego

nível de tráfego	J_{nr} (kPa ⁻¹) máximo	ESALs e/ou velocidade
padrão (S)	4,5	< 10 milhões <u>e</u> velocidade padrão ($V_M > 70$ km/h)
pesado (H)	2,0	entre 10 e 30 milhões <u>ou</u> tráfego lento ($20 < V_M < 70$ km/h)
muito pesado (V)	1,0	> 30 milhões <u>ou</u> tráfego parado ($V_M < 20$ km/h)
extremamente pesado (E)	0,5	> 30 milhões <u>e</u> tráfego parado ($V_M < 20$ km/h)

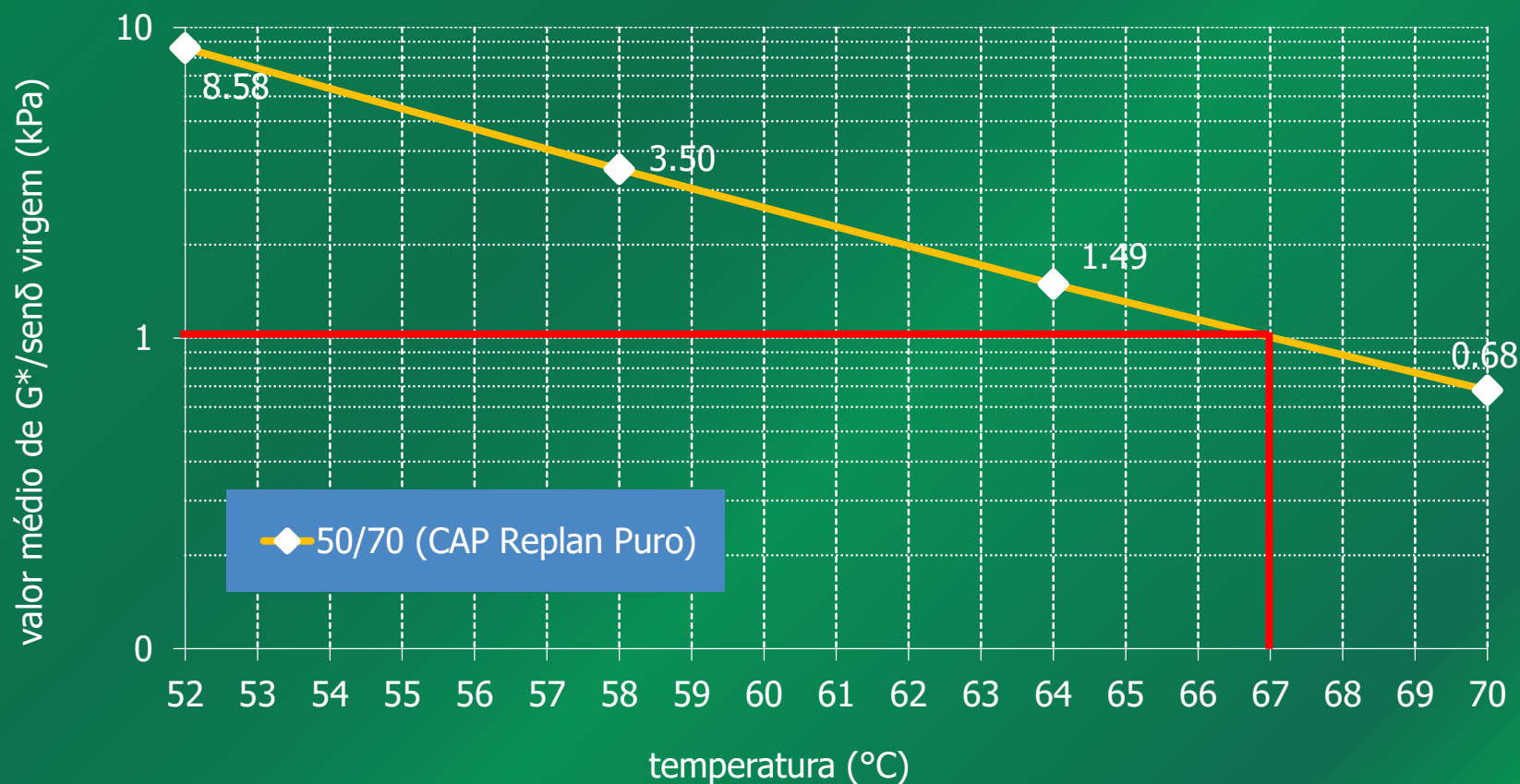
Determinação do grau de desempenho (PG) – Superpave 2.0



- *nada muda em relação à versão anterior da especificação*
- medir $S[60]$ e $m[60]$ dos ligantes asfálticos envelhecidos a longo prazo
 - 0, -6, -12, -18, -24, -30... (°C)
- $S[60] < 300$ MPa
- $m[60] > 0,3$
- temperatura reportada é a temperatura crítica - 10°C

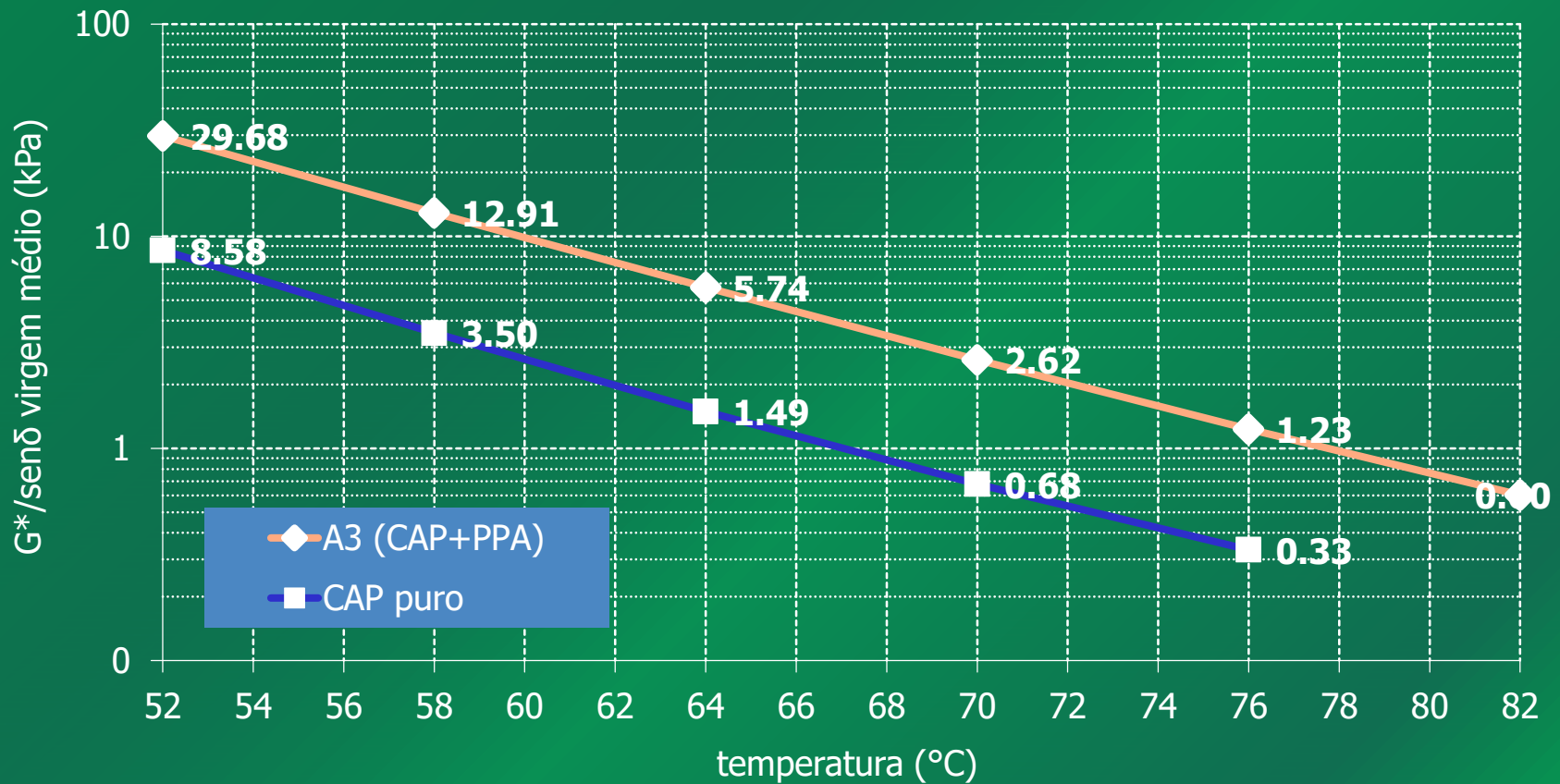
Classificação por desempenho - PG

Determinando o grau contínuo em temperatura altas



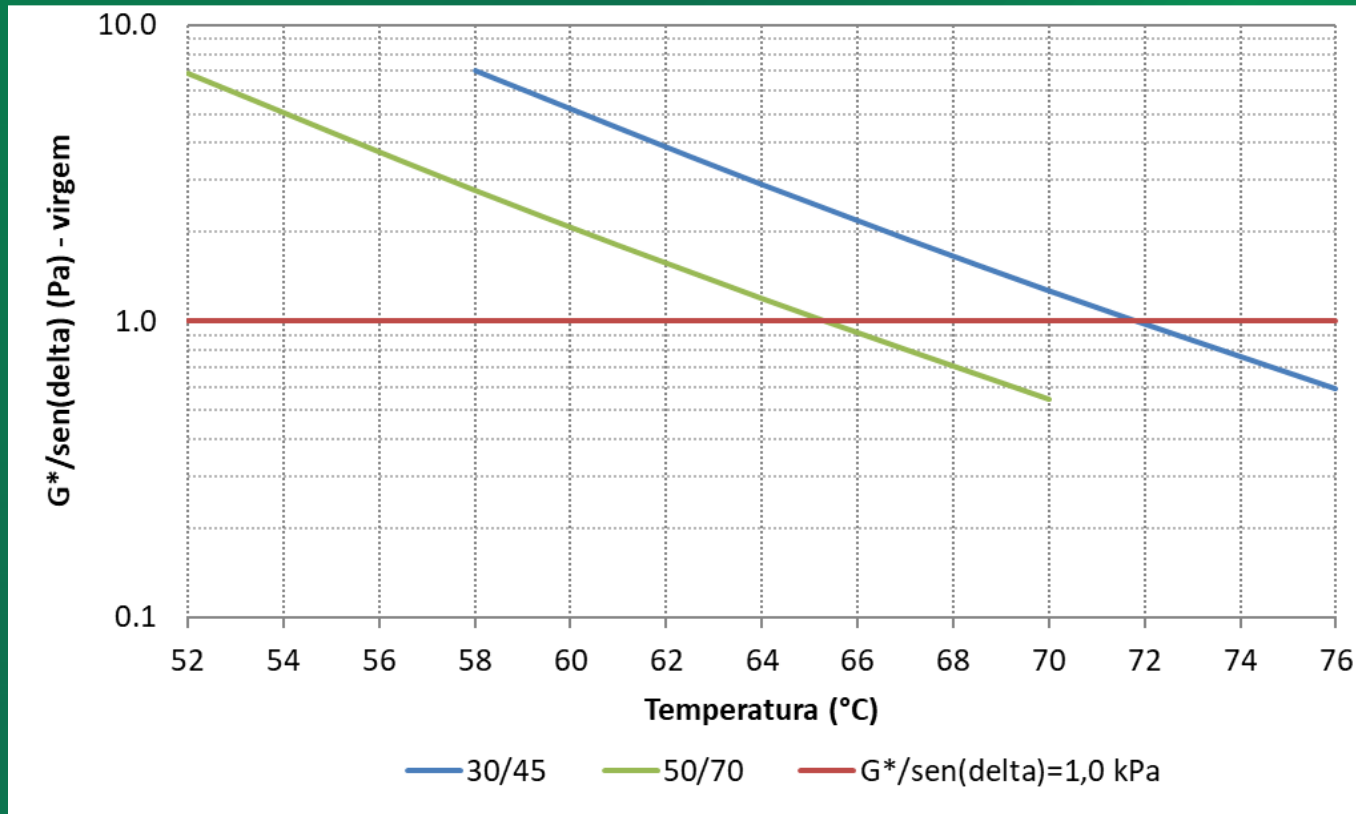
Classificação por desempenho - PG

Efeito da adição de um modificador



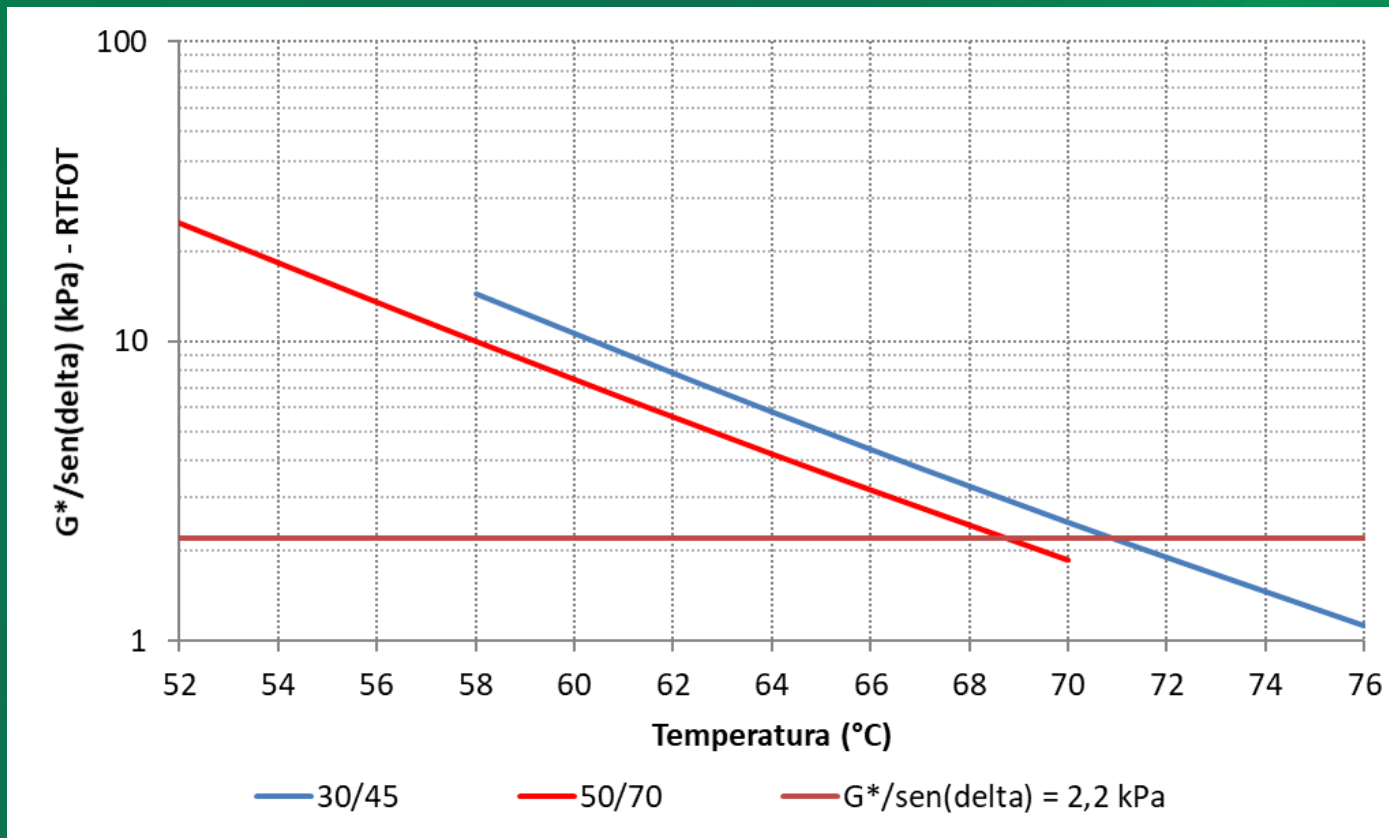
Classificação por desempenho - PG

PG temperatura alta – asfaltos convencionais



Classificação por desempenho - PG

PG temperatura alta



Classificação por desempenho - PG

PG temperatura alta – 30/45

temperatura (°C)	amostra virgem			amostra envelhecida a curto prazo		
	medida 1	medida 2	variabilidade (%)	medida 1	medida 2	variabilidade (%)
64	7.15	6.96	2.7	14.12	14.71	4.1
70	2.93	2.87	1.8	5.72	5.92	3.4
76	1.28	1.26	1.3	2.47	2.52	2.1
82	0.59	0.59	0.8	1.12	1.13	0.8
grau contínuo	71.8	71,7	0.1	70.9	71.0	0.1
média	71.8		-	71.0		-
PG	70			70		
PG final	70					

Classificação por desempenho - PG

PG temperatura alta – 50/70

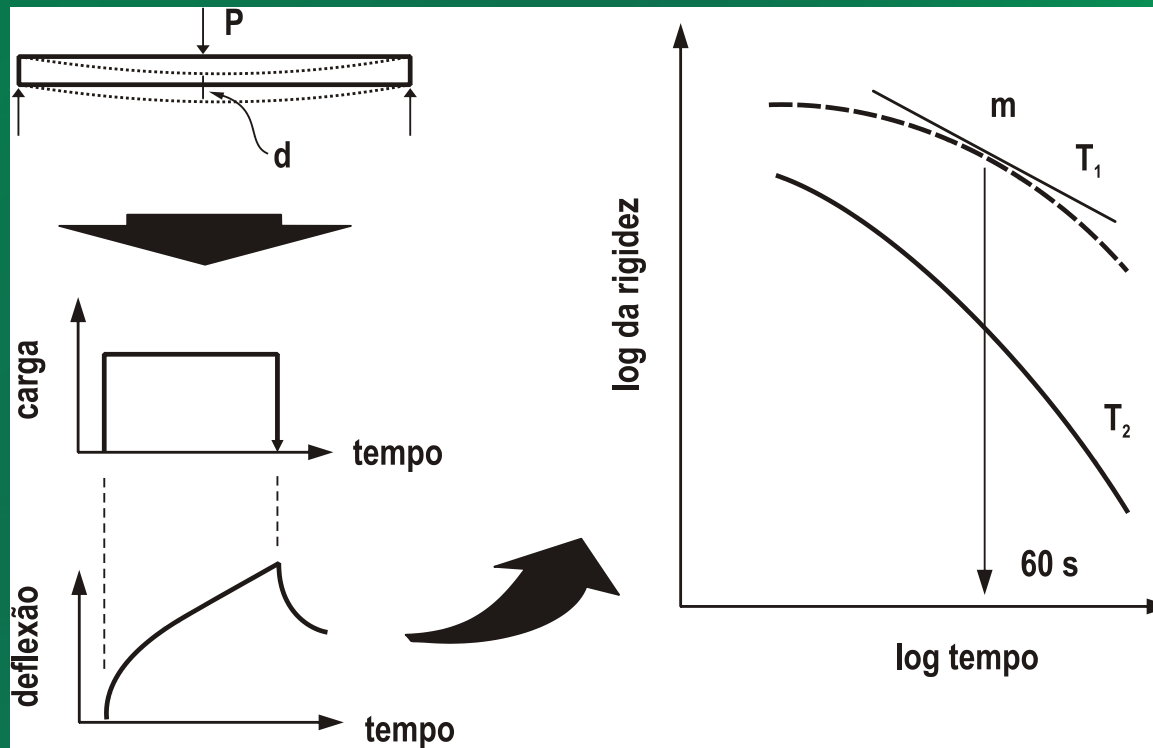
temperatura (°C)	amostra virgem			amostra envelhecida a curto prazo		
	medida 1	medida 2	variabilidade (%)	medida 1	medida 2	variabilidade (%)
52	6.87	6.91	0.5	24.27	25.50	5.0
58	2.76	2.78	0.7	9.74	10.28	5.3
64	1.19	1.20	1.1	4.08	4.31	5.4
70	0.54	0.55	1.2	1.80	1.90	5.1
grau contínuo	65.3	65.4	0.2	68.6	69.0	0.6
média	65.4		-	68.8		-
PG	64			64		
PG final	64					

Classificação por desempenho - PG

Reômetro de flexão em viga - BBR



Medidas no BBR



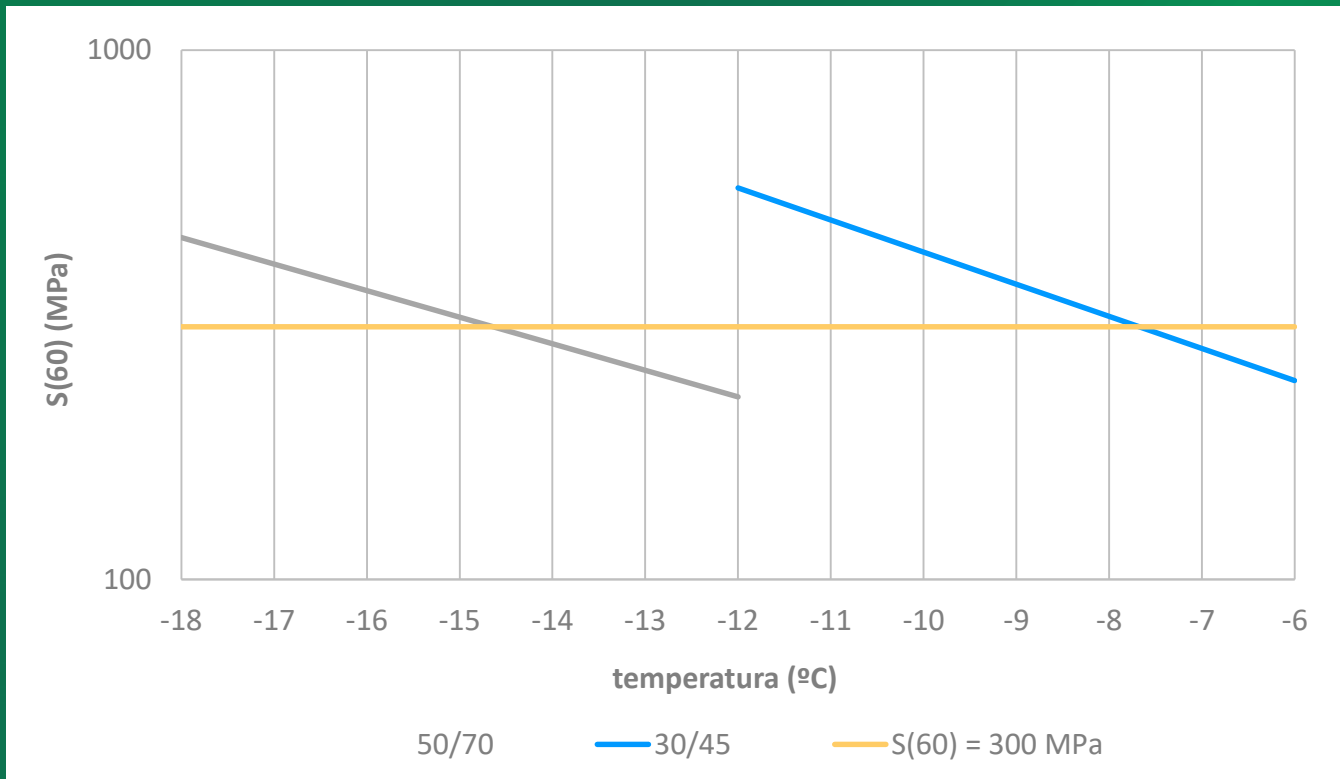
$$S_m(t) = \frac{PL^3}{4bh^3 \delta(t)}$$

$$\log S_e(t) = A + B \cdot [\log(t)] + C \cdot [\log(t)]^2$$

$$m(t) = |B + 2 \cdot C \cdot \log(t)|$$

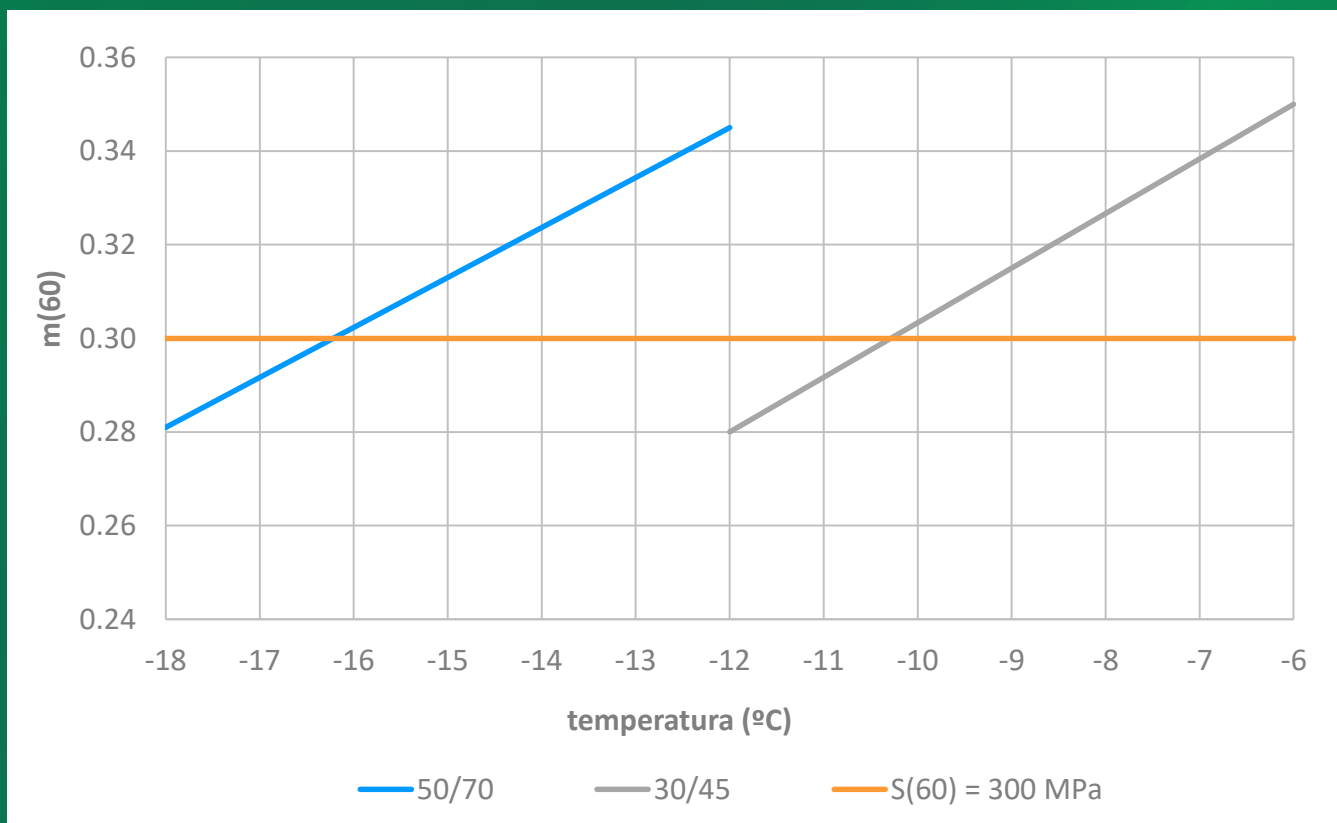
Classificação por desempenho - PG

PG em temperatura baixa – asfaltos convencionais



Classificação por desempenho - PG

PG em temperatura baixa – asfaltos convencionais



Classificação por desempenho - PG

PG em temperatura baixa

S(60)	medida 1	medida 2	média	variabilidade (%)
-12	221.08	219.07	220.08	0.9
-18	442.41	442.11	442.26	0.1
-24	745.32	776.08	760.70	4.0
$T_{crítica}$	-14.1	-14.2	-14.2	-0.3
$T_{crítica} - 10$	-24.1	-24.2	-24.2	
PG	-22.0			
m(60)	medida 1	medida 2	média	variabilidade (%)
-12	0.345	0.339	0.34	1.8
-18	0.281	0.270	0.28	4.0
-24	0.233	0.224	0.23	3.9
$T_{crítica}$	-16.2	-15.4	-15.8	-5.2
$T_{crítica} - 10$	-26.2	-25.4	-25.8	
PG	-22.0			
PG [S(60)]	-22.0			
PG [m(60)]	-22.0			
PG final	-22			
ΔT_c	1.65			

50/70

S(60)	medida 1	medida 2	média	variabilidade (%)
-6	237.45	241.58	239.5	1.7
-12	549.20	566.10	557.7	3.0
-18	-	-	-	-
$T_{crítica}$	-7.2	-7.1	-7.1	-1.7
$T_{crítica} - 10$	-17.2	-17.1	-17.1	
PG	-16.0			
m(60)	medida 1	medida 2	média	variabilidade (%)
-6	0.350	0.351	0.351	0.3
-12	0.280	0.285	0.283	1.8
-18	-	-	-	-
$T_{crítica}$	-10.3	-10.6	-10.5	-3.4
$T_{crítica} - 10$	-20.3	-20.6	-20.5	
PG	-16.0			
PG [S(60)]	-16.0			
PG [m(60)]	-16.0			
PG final	-16			
ΔT_c	3.32			

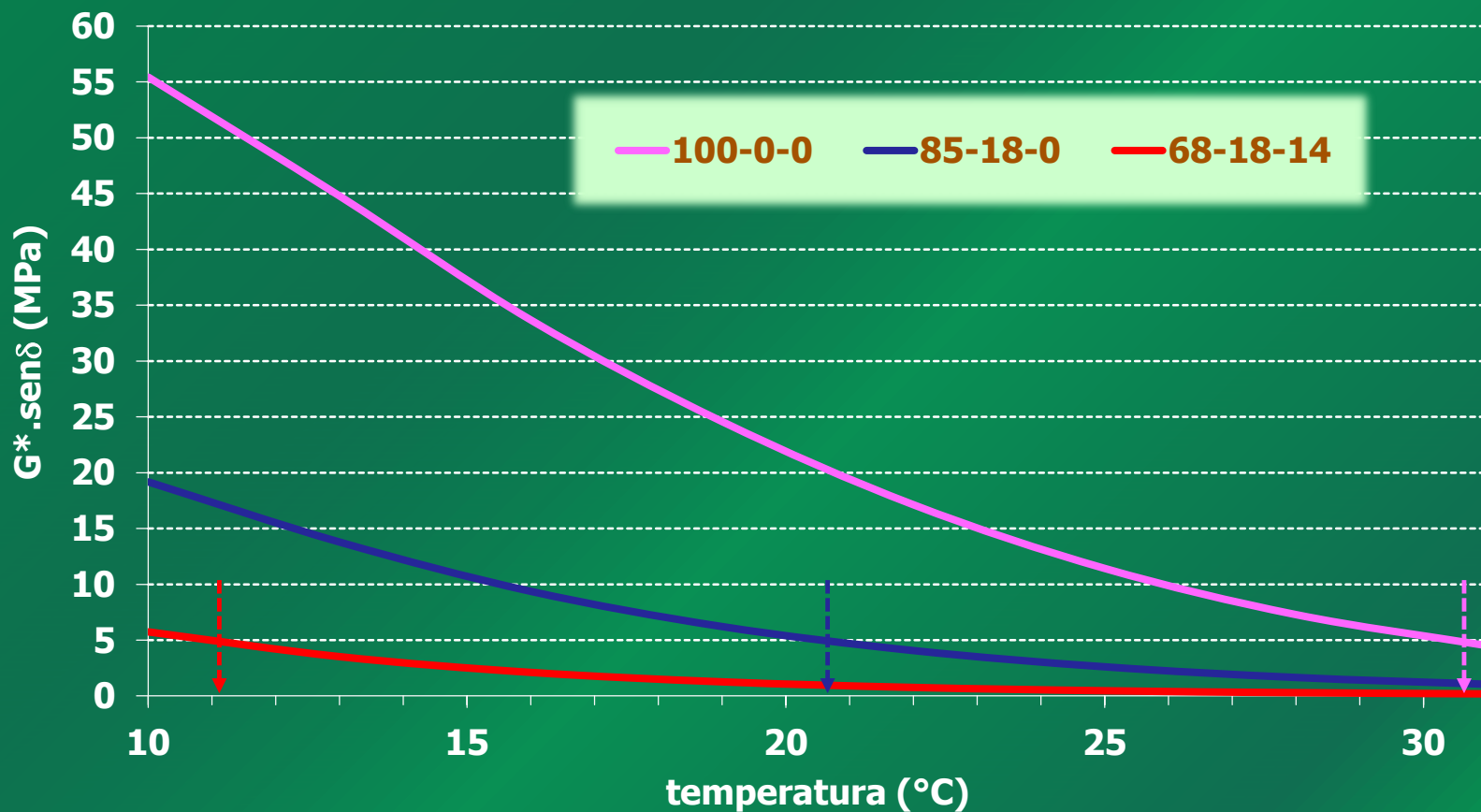
30/45

Trincamento por fadiga (parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$)

- nomenclatura PG não inclui nenhuma informação relativa ao trincamento à fadiga
- **definição de uma temperatura crítica de fadiga**
 - temperatura em que $G^* \cdot \text{sen} \delta = 5$ MPa (tráfego nível S)
 - temperatura em que $G^* \cdot \text{sen} \delta = 6$ MPa (tráfegos nível H, V e E)
- **temperaturas inferiores à temperatura crítica de fadiga criariam condições favoráveis ao trincamento precoce da mistura asfáltica por fadiga**
- o parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ representou, à época, um grande avanço na seleção de materiais
 - ensaio em regime oscilatório de cisalhamento
 - faixa de viscoelasticidade linear (pequenas deformações) – cargas de baixa magnitude não induzem dano à amostra, i.e, a amostra não é levada à ruptura
 - materiais envelhecidos a longo prazo
 - poucos ciclos de carregamento, diferentemente do que ocorre em pista

Classificação por desempenho - PG

Temperatura crítica de fadiga



Classificação por desempenho - PG

Como os EUA selecionam os asfaltos?

TABLE 1 Performance Graded Asphalt Binder Specification

Performance Grade	PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
Average 7-day maximum Pavement Design Temperature, °C	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
Minimum Pavement Design Temperature, °C ^A	> -34 > -40 > -46	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40 > -46	> -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34
Original Binder							
Flash Point Temp., D 92; min °C	230						
Viscosity, D 4402; ^B max. 3 Pa·s, Test Temp., °C	135						
Dynamic Shear, P 246; ^C G'/sinδ, min. 1.00 kPa 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Rolling Thin Film Oven (Test Method D 2872)							
Mass Loss, max. percent	1.00						
Dynamic Shear, P 246; ^C G'/sinδ, min. 2.20 kPa 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Pressure Aging Vessel Residue (AASHTO PP1)							
PAV Aging Temperature, °C ^D	90	90	100	100	100(110)	100(110)	100(110)
Dynamic Shear, P 246; ^C G'/sinδ, max 5000 kPa 8 mm Plate, 2 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
Creep Stiffness, P 245; ^E S, max 300 MPa, m-value; min. 0.300 Test Temp. at 60 s, °C	-24 -30 -36	0 - 6 -12 -18 -24 -30 -36	- 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24	0 - 6 -12 -18 -24
Direct Tension, P 252; ^F Failure Strain, min. 1.0 % Test Temp. at 1.0 mm/min., °C	-24 -30 -36	0 - 6 -12 -18 -24 -30 -36	- 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24	0 - 6 -12 -18 -24

^APavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the SUPERPAVE software program, or are provided by the specifying agency.

^BThe referee method shall be D 4402 using a #21 spindle at 20RPM, however alternate methods may be used for routine testing and quality assurance. This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

^CFor quality control of unmodified asphalt cement production, measurement of the viscosity of the original asphalt cement may be substituted for dynamic shear measurements of G'/sinδ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid. Any suitable standard means of viscosity measurement may be used, including capillary or rotational viscometry (Test Methods D 2170 or D 2171).

^DThe PAV aging temperature is based on simulated climatic conditions and is one of three temperatures 90°C, 100°C or 110°C. The PAV aging temperature is 100°C for PG 64- and above, except in desert climates, where it is 110°C.

^EIf the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.

Classificação por desempenho - PG

TABLE 1 Performance Graded Asphalt Binder Specification

Performance Grade	PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	-34 -40 -46	-10 -16 -22 -28 -34 -40 -46	-16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34	-10 -16 -22 -28 -34
Average 7-day maximum Pavement Design Temperature, °C	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
Minimum Pavement Design Temperature, °C ^A	> -34 > -40 > -46	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40 > -46	> -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34
Original Binder							
Flash Point Temp., D 92; min, °C	230						
Viscosity, D 4402; ^B max. 3 Pa·s, Test Temp., °C	135						
Dynamic Shear, P 246; ^C G*/sinδ, min. 1.00 kPa 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Rolling Thin Film Oven (Test Method D 2872)							
Mass Loss, max. percent	1.00						
Dynamic Shear, P 246; G*/sinδ, min. 2.20 kPa 25 mm Plate, 1 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Pressure Aging Vessel Residue (AASHTO PP1)							
PAV Aging Temperature, °C ^D	90	90	100	100	100(110)	100(110)	100(110)
Dynamic Shear, P 246; G*/sinδ, max 5000 kPa 8 mm Plate, 2 mm Gap Test Temp. at 10 rad/s, °C	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
Creep Stiffness, P 245; ^E S, max 300 MPa, m-value; min. 0.300 Test Temp at 60 s, °C	-24 -30 -36	0 - 6 -12 -18 -24 -30 -36	- 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24	0 - 6 -12 -18 -24
Direct Tension, P 252; ^F Failure Strain, min. 1.0 % Test Temp. at 1.0 mm/min, °C	-24 -30 -36	0 - 6 -12 -18 -24 -30 -36	- 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24 -30	0 - 6 -12 -18 -24	0 - 6 -12 -18 -24

^APavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the SUPERPAVE software program, or are provided by the specifying agency.

^BThe referee method shall be D 4402 using a #21 spindle at 20RPM, however alternate methods may be used for routine testing and quality assurance. This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

^CFor quality control of unmodified asphalt cement production, measurement of the viscosity of the original asphalt cement may be substituted for dynamic shear measurements of G*/sinδ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid. Any suitable standard means of viscosity measurement may be used, including capillary or rotational viscometry (Test Methods D 2170 or D 2171).

^DThe PAV aging temperature is based on simulated climatic conditions and is one of three temperatures 90°C, 100°C or 110°C. The IPAV aging temperature is 100°C for PG 64- and above, except in desert climates, where it is 110°C.

^EIf the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.