



Resultados Iniciais da Campanha Experimental do TED nº 702/2020

Breno Salgado Barra

TED nº 702/2020

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR DE
MISTURAS ASFÁLTICAS NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS SUBMETIDOS A CARREGAMENTO DINÂMICO**



MINISTÉRIO DOS
TRANSPORTES



TED nº 702/2020

**RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE OS RESULTADOS DA
CAMPANHA EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO QUANTO
AO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS MATERIAIS
EM CONCRETO ASFÁLTICO – 1ª PARTE**

PRODUTO III



MINISTÉRIO DOS
TRANSPORTES



EQUIPE TÉCNICA

Laboratório de Transportes e Logística – Labtrans

Wellington Longuini Repette - Eng. Civil, Dr. – Prof. do Departamento de Engenharia Civil

Coordenação Geral do TED nº 702/2020 (UFSC-DNIT)

Gustavo Garcia Otto – Eng. Civil, Dr.

Coordenação Técnica do TED nº 702/2020 (UFSC-DNIT)

Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação – LDTPav

Breno Salgado Barra - Eng. Civil, Dr. – Prof. do Departamento de Engenharias da Mobilidade

Yader Alfonso Guerrero Pérez - Eng. Civil, Dr. – Prof. do Departamento de Engenharias da Mobilidade

Laboratório de Pavimentação – LabPav

Luciana Rohde - Eng. Civil, Dra. – Profa. do Departamento de Engenharia Civil

João Victor Staub de Melo - Eng. Civil, Dr. – Prof. do Departamento de Engenharia Civil



ABORDAGEM

- ☐ Considerações Iniciais
- ☐ Caracterização dos Materiais
 - ☐ Granulares
 - ☐ Ligantes betuminosos
- ☐ Curvas Granulométricas
- ☐ Resultados e Discussões
 - ☐ Massa volumétrica real – MVR
 - ☐ Reometria por cisalhamento dinâmico – DSR
 - ☐ Habilidade de compactação – PCG
 - ☐ Resistência à ação deletéria da água – Duriez
 - ☐ Resistência à deformação permanente – Orniérage
- ☐ Considerações Finais

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

❑ Conjuntura geral

❑ Início: Novembro 2020

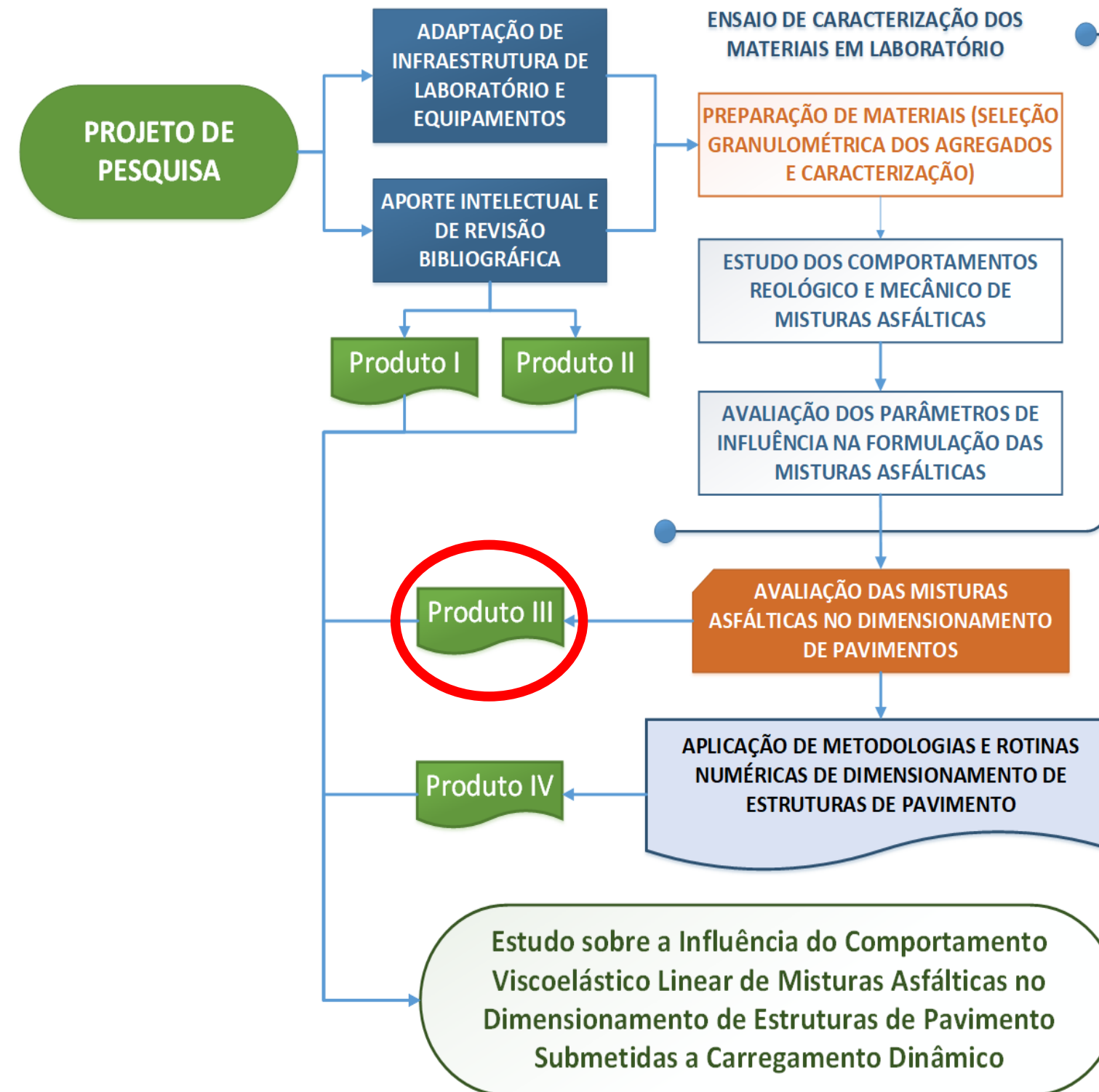
❑ Término: Novembro de 2025

❑ Valor: R\$ 5.424.132,16

❑ Atividades: 4 nichos

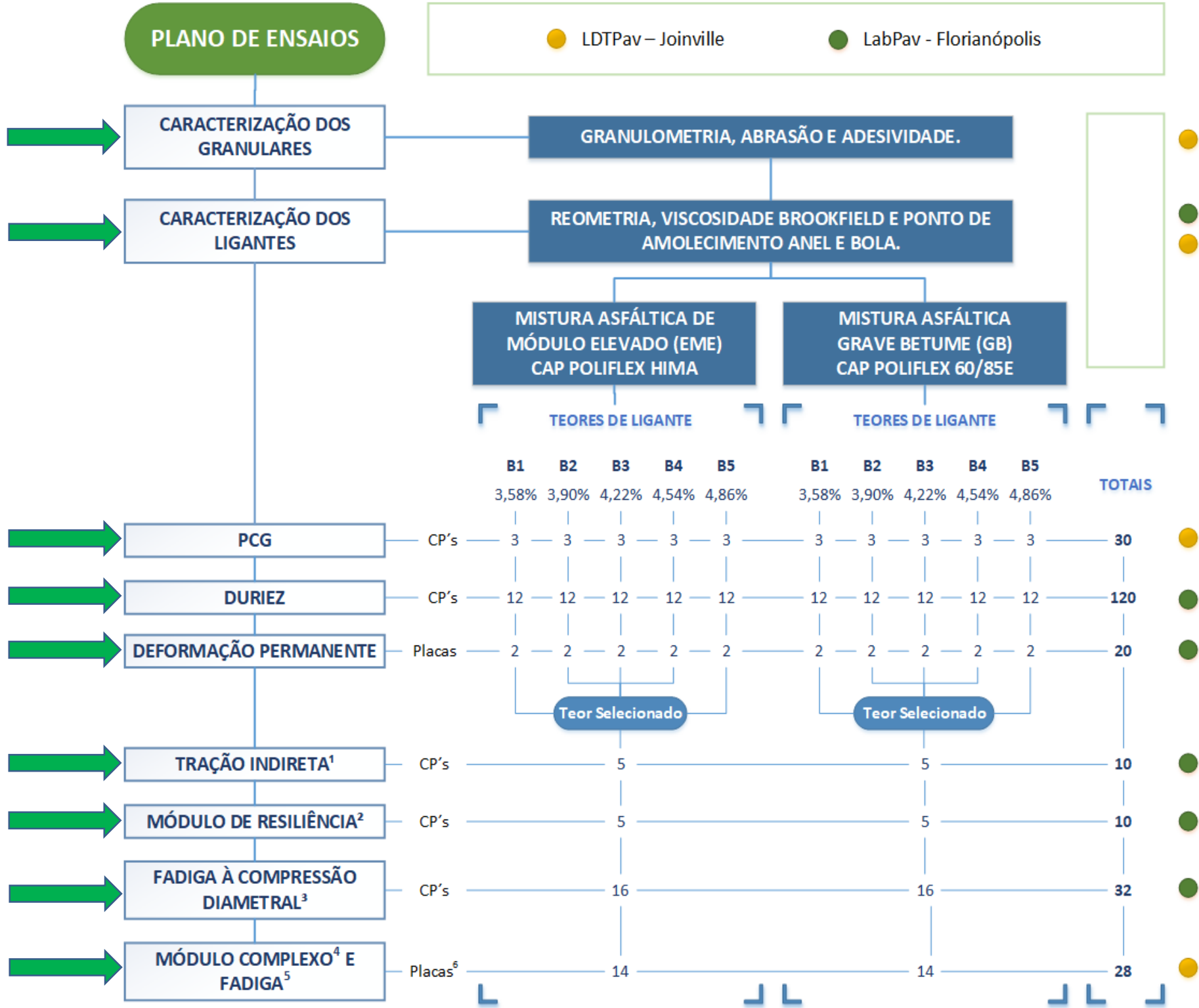
❑ Produtos: 4

❑ Capacitações: 5



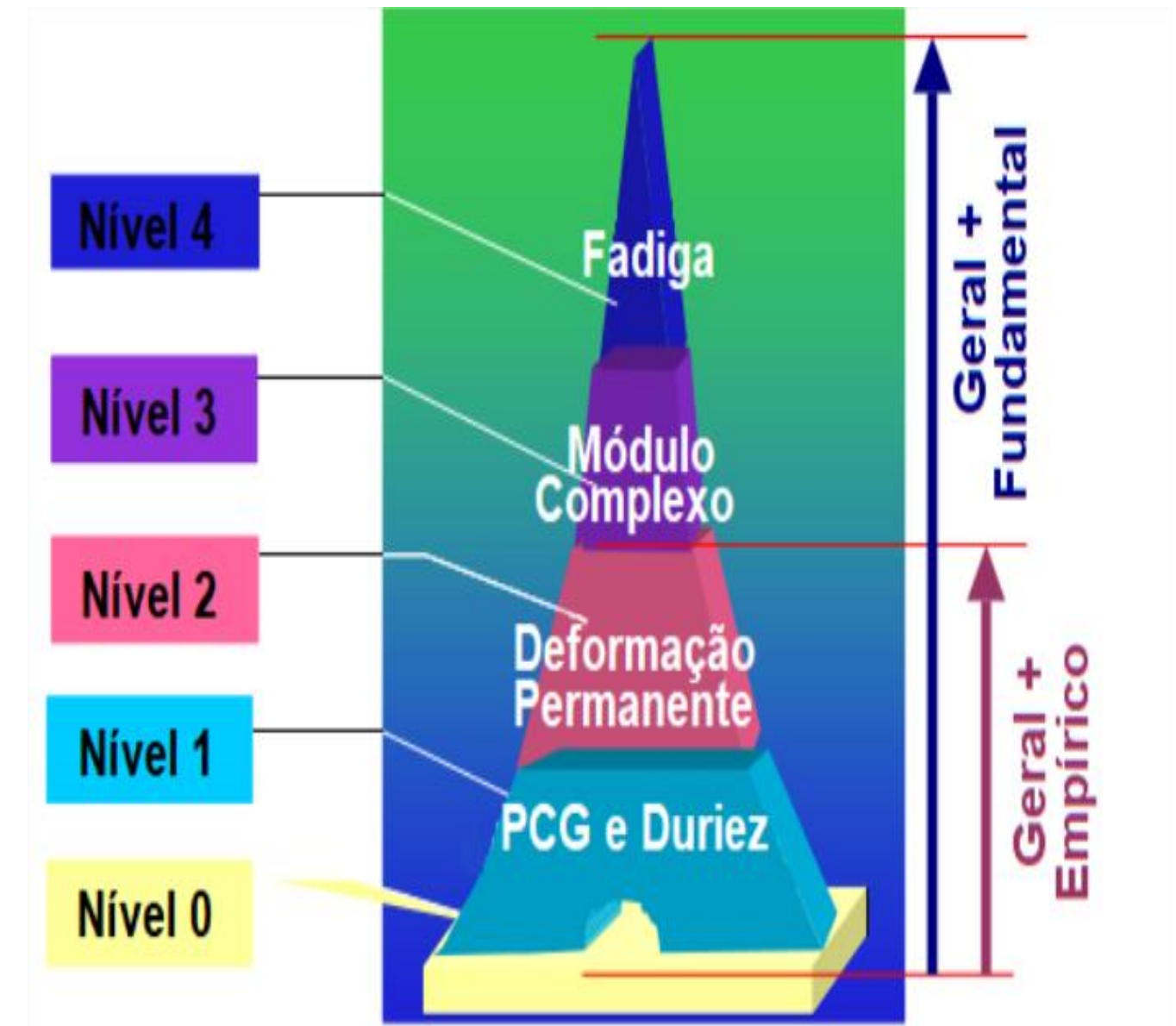
CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Fluxograma



CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- ❑ Resultados no contexto laboratorial da metodologia francesa;
- ❑ Elaboração de um método para formulação de misturas asfálticas:
 - ❑ Processo complexo;
 - ❑ Numerosa quantidade de comparações entre os resultados de campo e de laboratório;
 - ❑ Longos períodos de pesquisa;
 - ❑ Ampla consonância com o contexto dos métodos de dimensionamento dos pavimentos.
- ❑ Âmbito dos níveis 0, 1 e 2.



CONSIDERAÇÕES INICIAIS

❑ Protocolos Normativos

[Granulares](#)

[PCG](#)

[Duriez](#)

[Deformação permanente](#)

EB-EME Enrobé Bitumineux – Enrobé à Module Élevé, Approche Fondamentale

Définition	Mélange bitumineux conforme à NF EN 13108-1, formulé pour être appliqué comme couche d'assises (base ou fondation) avec une épaisseur comprise entre 6 cm et 8 cm pour EB10-EME entre 7 cm et 13 cm pour EB14-EME entre 9 cm et 15 cm pour EB20-EME. Le module et la résistance en fatigue élevés permettent des réductions d'épaisseur des couches d'assise. Classification en EB-EME classe 1 et EB-EME classe 2 et la résistance en fatigue			
Identification	EB10-EME1 ou EB10-EME2 selon NF EN 13108-1 EB14-EME1 ou EB14-EME2 selon NF EN 13108-1 EB20-EME1 ou EB20-EME2 selon NF EN 13108-1 Couche de base ou de fondation Approche Fondamentale			
Caractéristiques principales				
Caractéristiques des granulats (Valeurs minimales)	Base	Fragmentation, Usure,	LA ₃₀ , M _{DE} 25	
	Fondation	Fragmentation Usure	LA ₄₀ , M _{DE} 35	
	Gravillon	Granularité Aplatissement Teneur en fines	G _C 85/20 ou G _{25/15} ; F ₁₂₅ ; f ₂	
	Sable ou grave	Granularité Valeur au bleu de Méthylène	G _F 85 ; G _{TC} 10 ; G _A 85 MB _F 10	
	Filler d'apport	Rigidité par delta TBA, Rigden	Δ _{TBA} 8/16 ; V _{28/38}	
Classification		EB-EME 1	EB-EME2	
Tenue à l'eau Méthod B (I/C)		ITSR ₇₀		
Presse à cisaillement giratoire	EB10-EME	80 gir.	V _{max10}	V _{max8}
	EB14-EME	100 gir.		
	EB20-EME	120 gir.		
Pourcentage de vides des plaques ↓		EB-EME1	EB-EME2	
		{Vi= 7% Vs = 10%}	{Vi= 3% Vs = 6%}	
Résistance à l'orniérage Grand Modèle 60°C	Nombre de cycles		30000	30000
	Catégorie de profondeur d'ornière		P _{7,5}	
Module	15°C, 10 Hz or 0,02 s		S _{min14000}	
Fatigue	2 points, 10°C, 25 Hz		ε _{G-100}	ε _{G-130}

Niveau 3

Niveau 4

↓

↓

EB-GB Enrobé Bitumineux - Grave-Bitume Approche Fondamentale

Définition	Mélange bitumineux conforme à NFEN 13108-1, formulé pour être appliqué comme couche d'assises (base ou fondation) avec une épaisseur comprise entre 8 cm et 16 cm. Classification par le module et la résistance en fatigue.				
Identification	EB14-GB2 ou AC20-GB2 selon NF EN 13108-1 EB14-GB3 ou AC20-GB3 selon NF EN 13108-1 EB14-GB4 ou AC20-GB4 selon NF EN 13108-1 Base ou fondation Approche Fondamentale				
Caractéristiques principales					
Caractéristiques des granulats (Valeurs minimales)	Base	Fragmentation, Usure,	LA ₃₀ , M _{DE} 25		
	Fondation	Fragmentation Usure	LA ₄₀ , M _{DE} 35		
	Gravillon	Granularité Aplatissement Teneur en fines	G _C 85/20 ou G _{25/15} ; F ₁₂₅ ; f ₂		
	Sable ou grave	Granularité Valeur au bleu de Méthylène	G _F 85 ; G _{TC} 10 ; G _A 85 MB _F 10		
	Filler d'apport	Rigidité par delta TBA, Rigden	Δ _{TBA} 8/16 ; V _{28/38}		
Classification			EB-GB 2	EB-GB 3	EB-GB 4
Tenue à l'eau Méthode B (I/C)			ITSR ₇₀		
Presse à cisaillement giratoire	EB14-GB	100 girations	V _{max11}	V _{max10}	V _{max9}
	EB20-GB	120 girations			
Résistance à l'orniérage Grand Modèle 60°C	Pourcentage de vides des plaques:		{Vi= 8% Vs = 11%}	{Vi= 7% Vs = 10%}	{Vi= 5% Vs = 8%}
	Nombre de cycles		10000		30000
	Catégorie de profondeur d'ornière		P ₁₀		
Pourcentage de vides des plaques ↓			EB-GB 2	EB-GB 3	EB-GB 4
			{Vi= 7% Vs = 10%}		{Vi= 5% Vs = 8%}
Module	15°C, 10 Hz or 0,02 s		S _{min9000}	S _{min9000}	S _{min11000}
Fatigue	2 points, 10°C, 25 Hz		ε _{G-80}	ε _{G-90}	ε _{G-100}

Niveau 3

Niveau 4

↓

↓

Adaptado de Manuel LPC (2007)

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Granulares: Rudnick Minérios Ltda.

Brita Gnáissica

$\%p_{0,075mm}$
2,0 % de cal hidratada CH-1
 $Ca^{+2}O^{-2} \geq 90 \%$
(CAL CEM, 2021)

Naftanato de Cálcio
(SANTANA, 1995)

Composição mineralógica (XRF) da brita
gnáissica majoritariamente quartzosa ($Si^{-4}O_2^{-2}$):
58,1 % (CLARA et al., 2021)

[Protocolo](#)

Ensaio	Norma	Limites	Resultados	
			2020 ¹	2023 ²
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNIT-ES 031 (2006)	Máx. 50 %	17,5 %	13,4 %
Índice de forma		Mín. 0,5	0,60	0,65
Resistência ao ataque químico (durabilidade)		Máx. 12 %	5,3 %	3,1 %
Adesividade ao ligante betuminoso		Má	Má	Má
Equivalência de areia		Mín. 50 %	78,0 %	82,0 %
Teor de material pulverulento	ABNT NBR 7211 (2019)	Máx. 1,0 %	0,4 %	0,1 %
Absorção		-	0,5 %	0,3 %

Fonte: ¹CLARA (2020); ²EVALDT (2023)

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

☐ Ligantes betuminosos: CBB Asfaltos Ltda.

Características		Unidade	Método de Ensaio	Resultados	Limites	
					Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento		°C	ABNT NBR 6560 (2016)	65,4	60	-
Penetração, 100 g, 5s, 25°C, 0,1mm		0,1mm	ABNT NBR 6576 (2007)	40	40	70
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C		%	ABNT NBR 15086 (2022)	90	85	-
Viscosidade Brookfield	135°C spindle 21 20 rpm	cP	ABNT NBR 15184 (2021)	1130	-	3000
	150°C spindle 21 50 rpm	cP		486	-	2000
	177°C spindle 21 100 rpm	cP		212	-	1000
Ponto de Fulgor		°C	ABNT NBR 11341 (2014)	268	235	-
Separação de fase		Δ P.A. (°C)	ABNT NBR 15166 (2004)	1,2	-	5
Massa específica a 25 °C		g/cm³	ABNT NBR 6296 (2012)	1,014	-	-

60/85 E

Fonte: Teixeira (2021)

Características		Unidade	Método de Ensaio	Resultados	Limites	
					Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento		°C	ABNT NBR 6560 (2016)	90	80	-
Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm		0,1 mm	ABNT NBR 6576 (2007)	41	40	70
Recuperação Elástica, 20cm, 25°C		%	ABNT NBR 15086 (2022)	96	90	-
Viscosidade Brookfield	135°C spindle 21 20 rpm	cP	ABNT NBR 15184 (2021)	1775	-	3000
	150°C spindle 21 50 rpm	cP		668	-	2000
	177°C spindle 21 100 rpm	cP		266	-	1000
Ponto de Fulgor		°C	ABNT NBR 11341 (2014)	261	235	-
Separação de Fase		Δ P.A. (°C)	ABNT NBR 15166 (2004)	2,0	-	5
Massa específica a 25°C		g/cm³	ABNT NBR 6296 (2012)	1,011	-	-

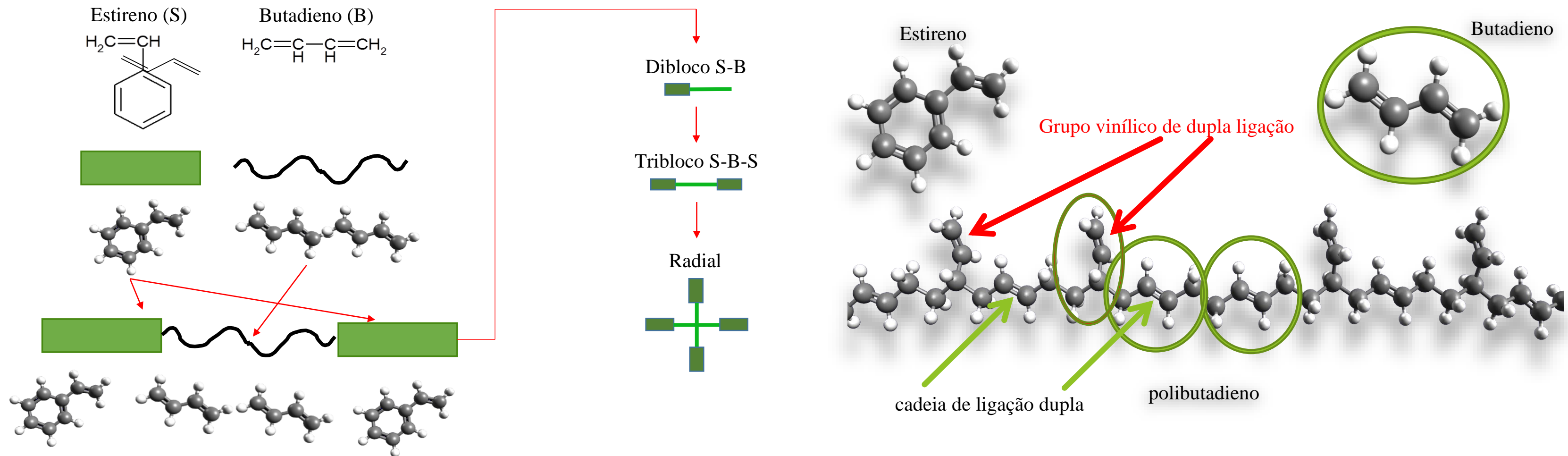
HiMA

[Deformação Permanente](#)



CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

□ Ligantes betuminosos: princípio estrutural e molecular



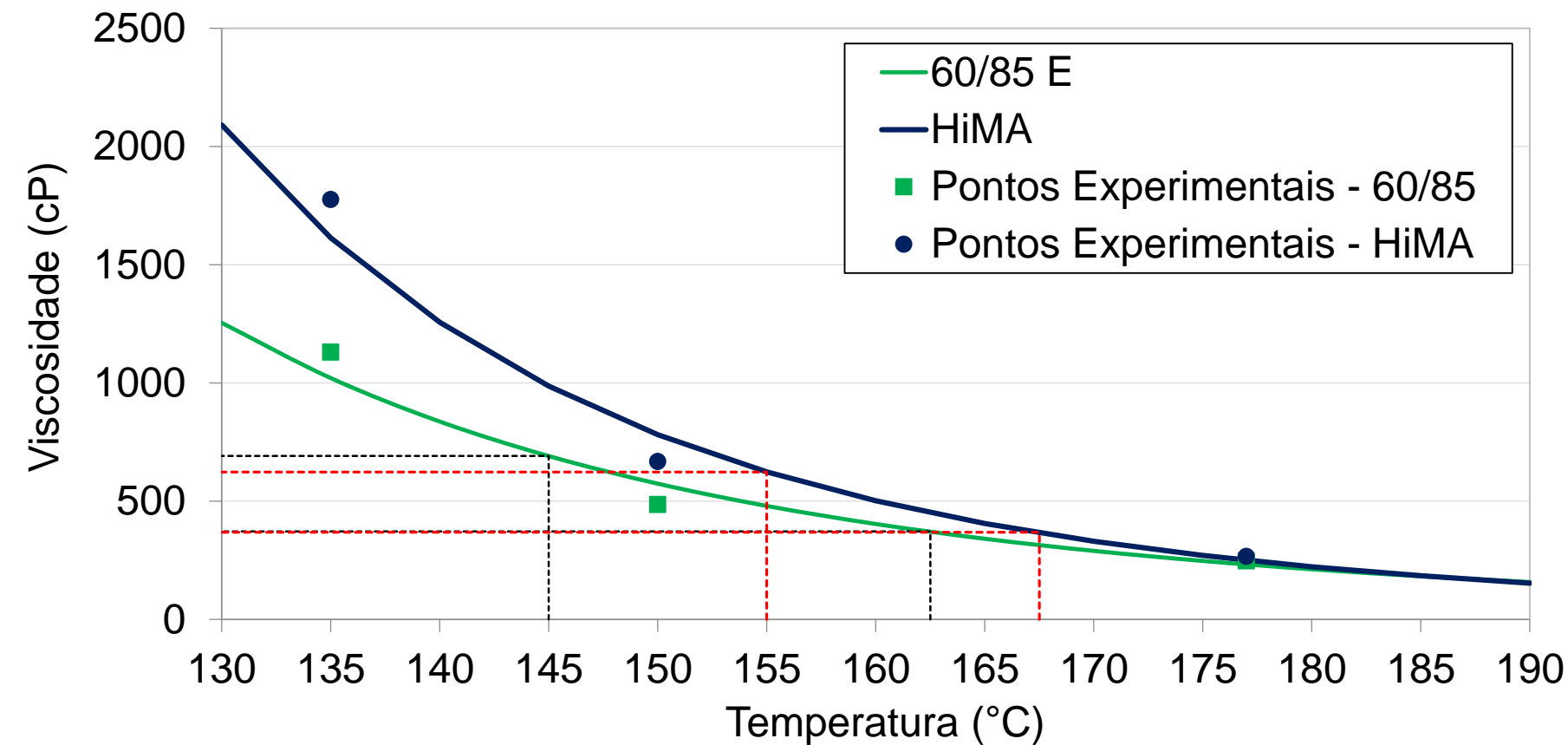
60/85 E: 4,0 % SBS (convencional) – 1101 AT (16 % de diblocos SB e 84 % de triblocos)
HiMA: 7,5 % SBS (princípio da inversão de fases) – D0243 (75 % de diblocos SB e 25 % de triblocos SBS)

Fonte: Adaptado de Kraton® (2021)

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

☐ Ligantes betuminosos:

Brookfield
(ABNT NBR 15184, 2004)



60/85 E
162 °C / 145 °C

HiMA
167 °C / 155 °C

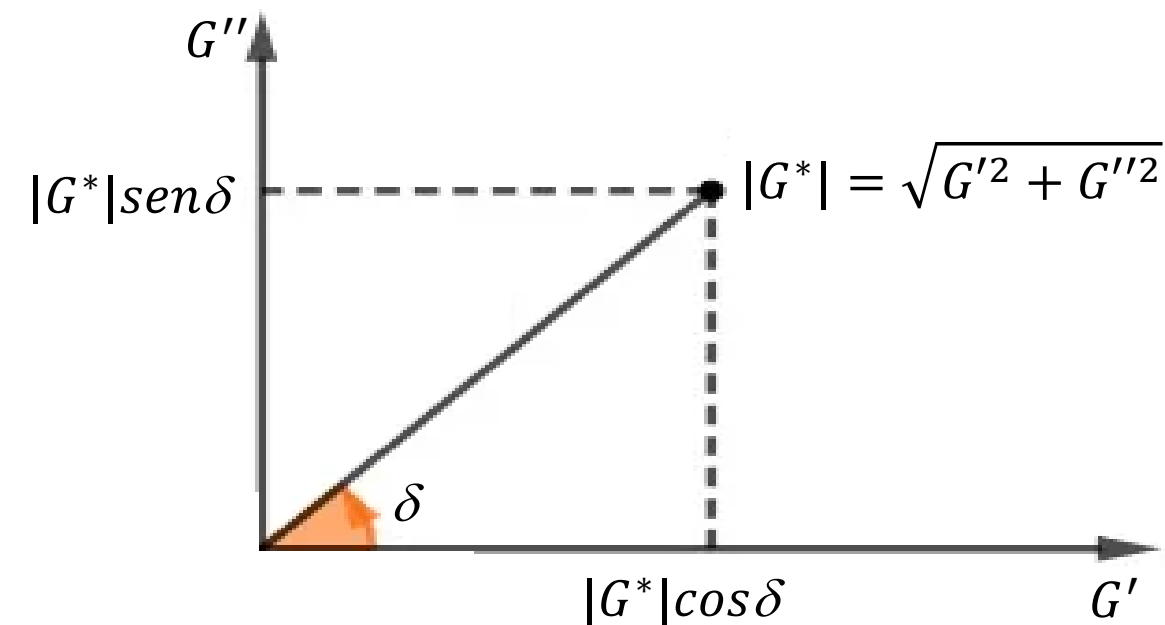
Granulares
↑13 °C usinagem

Critérios: DNER-ES 385 (1999) e recomendações do fornecedor!

Fonte: Teixeira (2021)

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

□ Ligantes betuminosos:



Reometria por cisalhamento dinâmico (DSR)
AFNOR NF EN 14770 (2012)

Representações gráficas:

- Curvas isócronas;
- Curvas isotérmicas;
- Plano Cole-Cole;
- Espaço de Black, e;
- Curva de equivalência frequência-temperatura.

Temperaturas:

-30 °C, -20 °C,
-10 °C, 0 °C,
10 °C, 20 °C,
30 °C, 40 °C,
50 °C, 60 °C,
70 °C e 80 °C

Frequências:

1 Hz
3 Hz
10 Hz
30 Hz

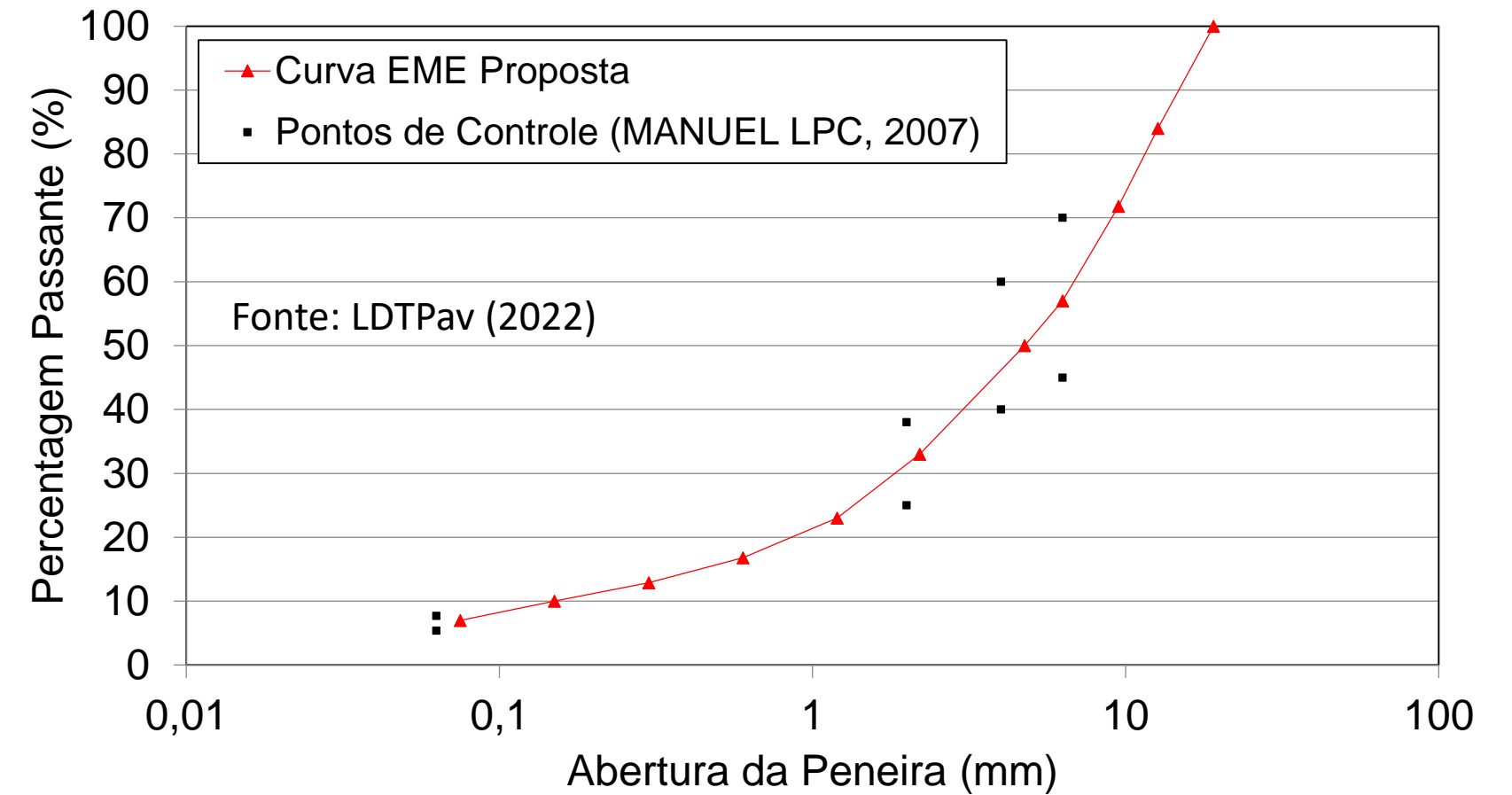
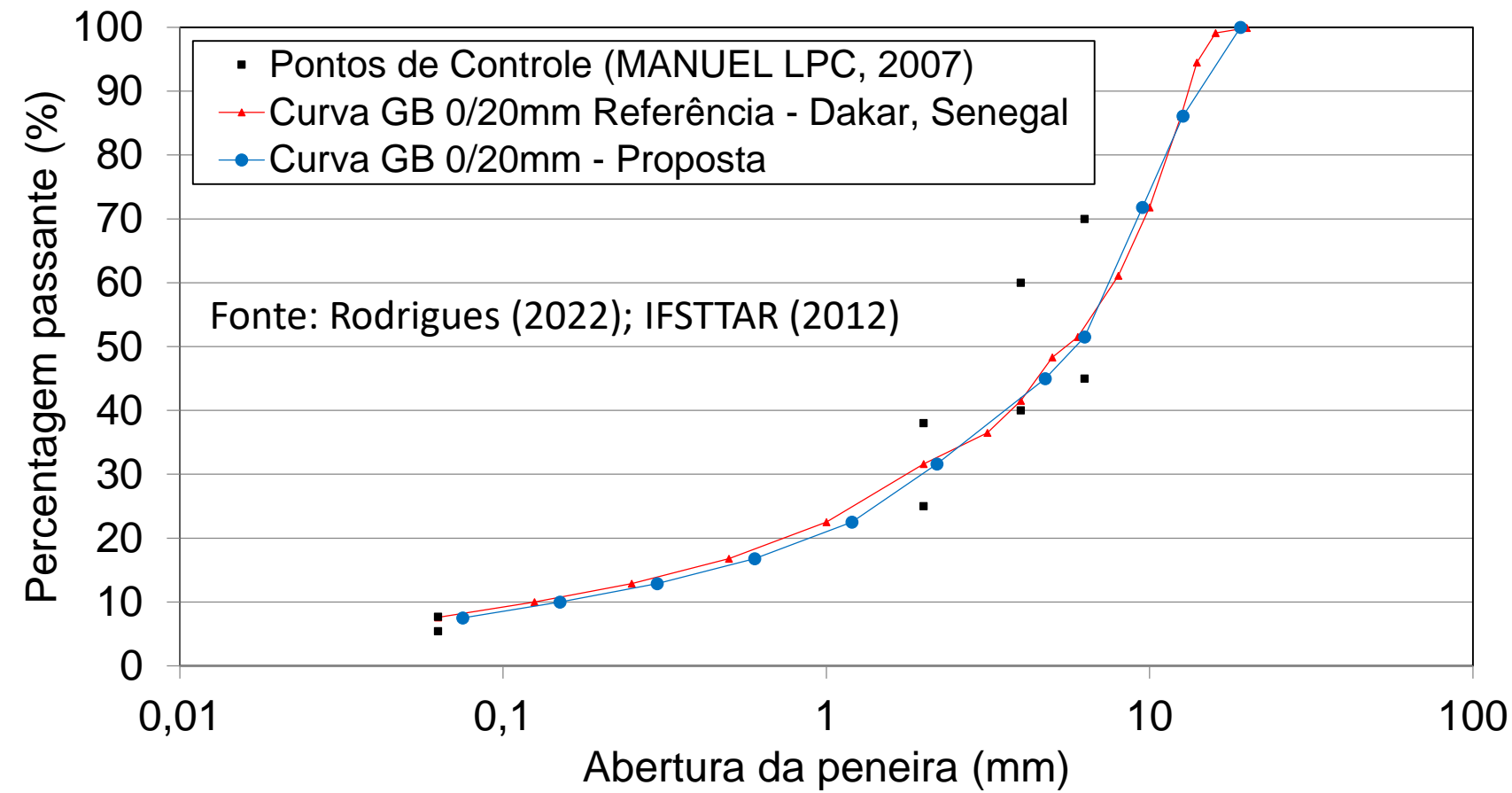
Geometrias:

4,0 mm: -30 °C a 0 °C
8,0 mm: 10 °C a 30 °C
25,0 mm: > 30 °C

Amplitudes:

5,0 μm : 10 °C a 80 °C
0,001 μm : -30 °C a 0 °C

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Füller-Talbot:

$$\% p = a \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^n$$

$$n = \frac{\log(\% p_{0,075mm}) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)}$$

Densa: $0,35 < n < 0,55$

Superfície Específica:

$$100 \cdot \Sigma = 0,25 \cdot G + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 150 \cdot f$$

Σ = superfície específica (m^2/kg);

G = % $> 6,3$ mm;

S = % $6,3 \text{ mm} \leq x < 0,250 \text{ mm}$;

s = % $0,250 \text{ mm} \leq x \leq 0,063 \text{ mm}$; e

f = % $< 0,063 \text{ mm}$.

Grave-Bitume (GB):

$D = 19,1 \text{ mm}$

$\% p_{0,075mm} = 7,5 \%$

$n = 0,47$

$\Sigma = 11,32 \text{ m}^2/kg$

Enrobé à Module Élevé (EME):

$D = 19,1 \text{ mm}$

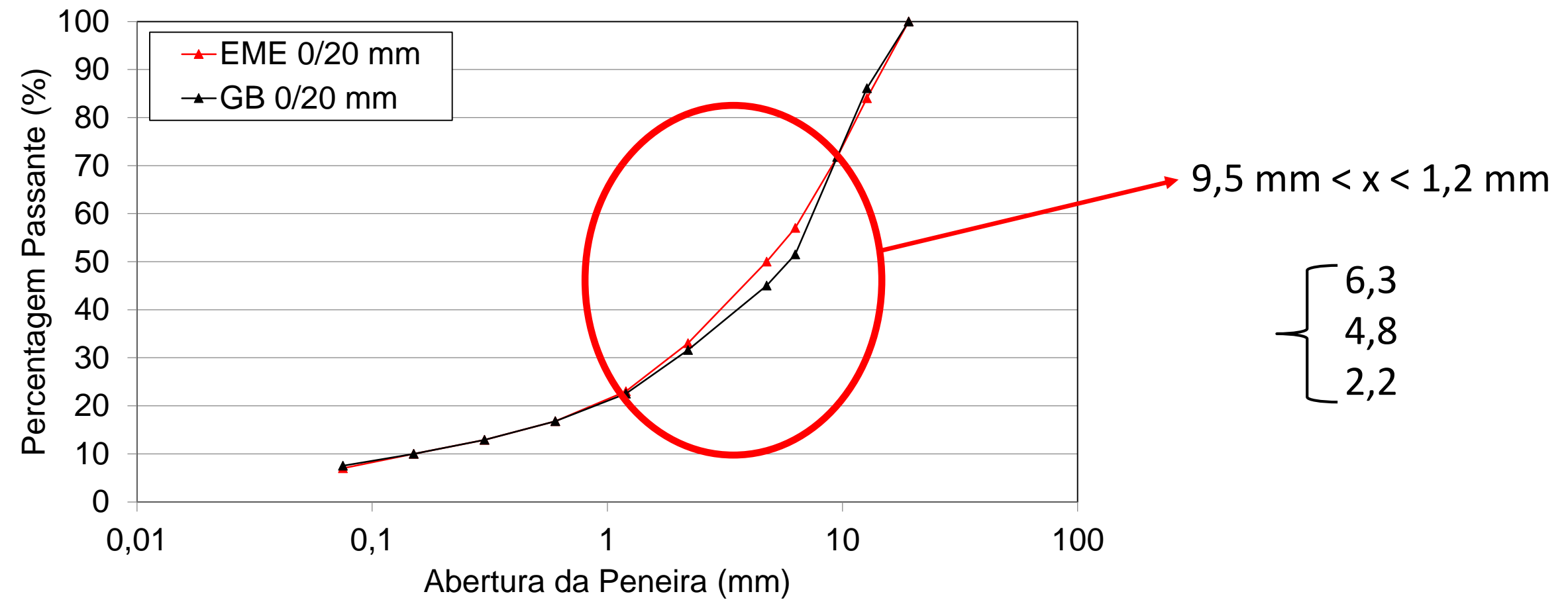
$\% p_{0,075mm} = 7,0 \%$

$n = 0,48$

$\Sigma = 12,63 \text{ m}^2/kg$

\neq
 $\Sigma = 1,31 \text{ m}^2/kg$

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Teores de Ligante (partida):

GB: 3,90 %, 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %.

EME: 4,54 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 % e 5,82 %.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

☐ MVR:



Teor de Ligante (%)	GB ¹	EME ²
	MVR (g/cm ³)	MVR (g/cm ³)
3,90	2,592	-
4,22	2,573	-
4,54	2,554	2,492
4,86	2,543	2,472
5,18	-	2,463
5,50	-	2,454
5,82	-	2,447

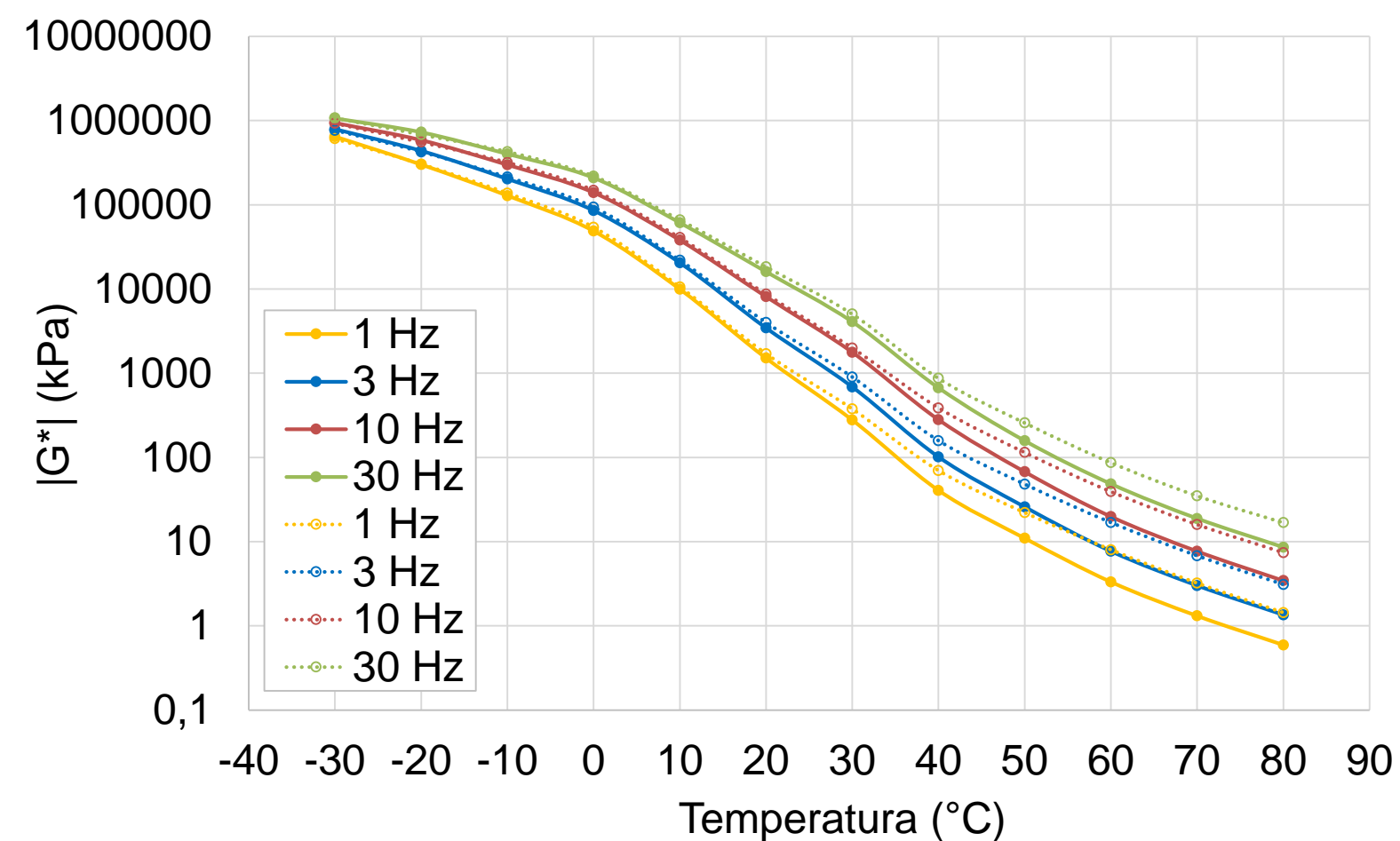
Fonte: ¹Rodrigues (2022); ²LDTPav (2022)

↑TL ↓MVR

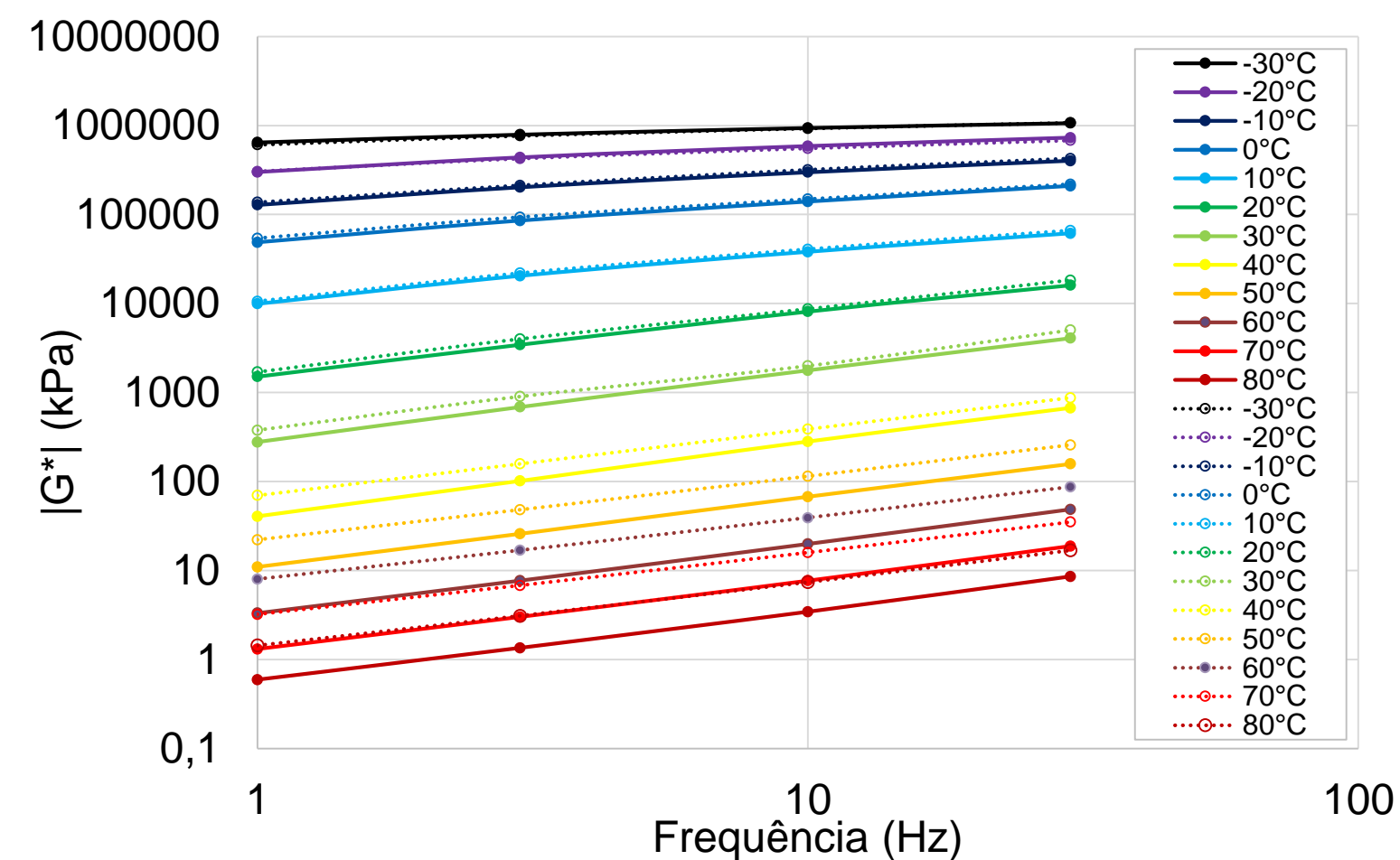
$MVR_g > 2,650 \text{ g/cm}^3$;
 $MVR_{lig.} = 1,014 \text{ g/cm}^3 \text{ (60/85 E)}; 1,011 \text{ g/cm}^3 \text{ (HiMA)}$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

DSR: linhas contínuas (60/85 E) e tracejadas (HiMA)



Curvas isócronas
Suscetibilidade térmica

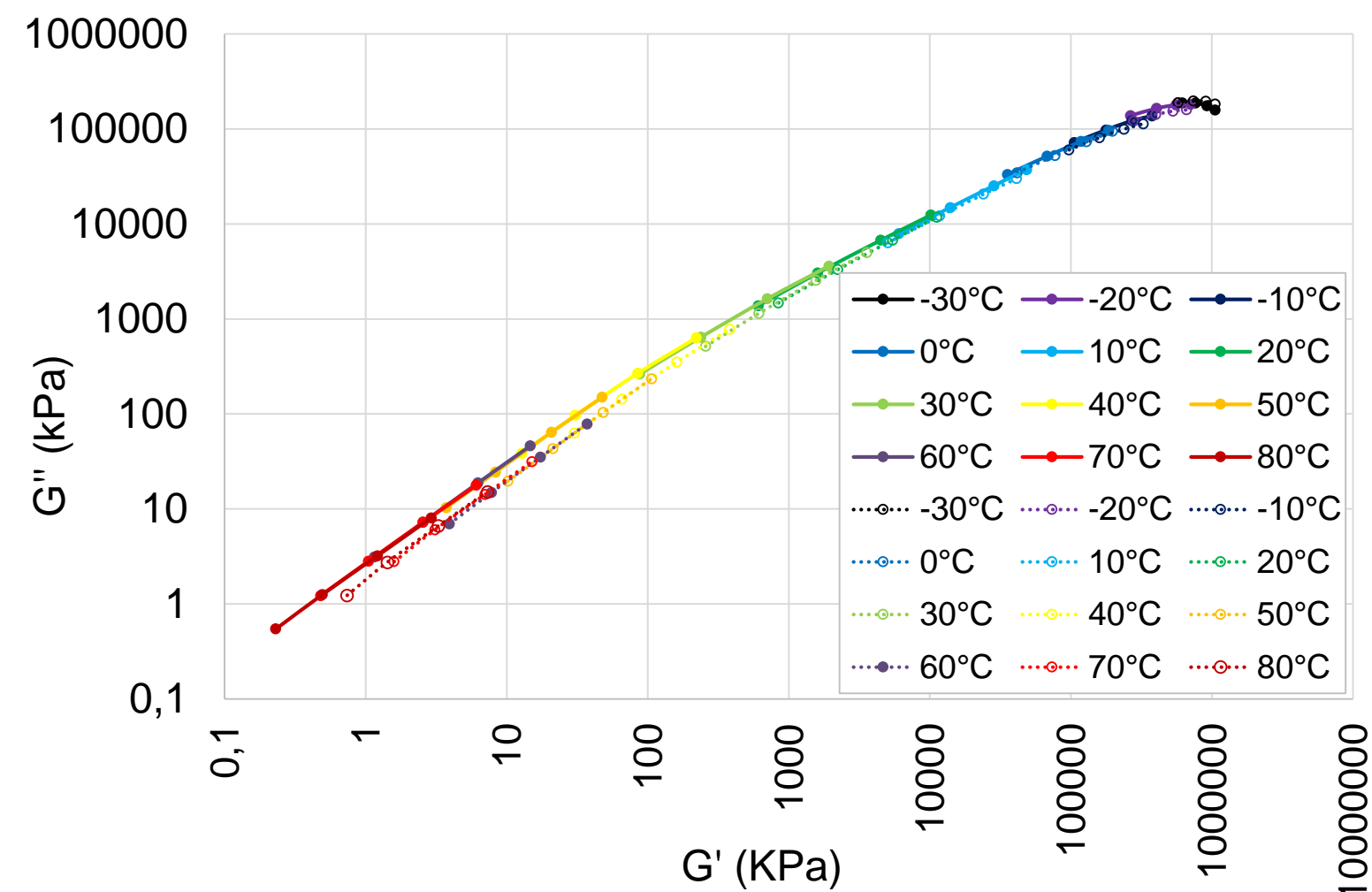


Curvas isotérmicas
Suscetibilidade cinética

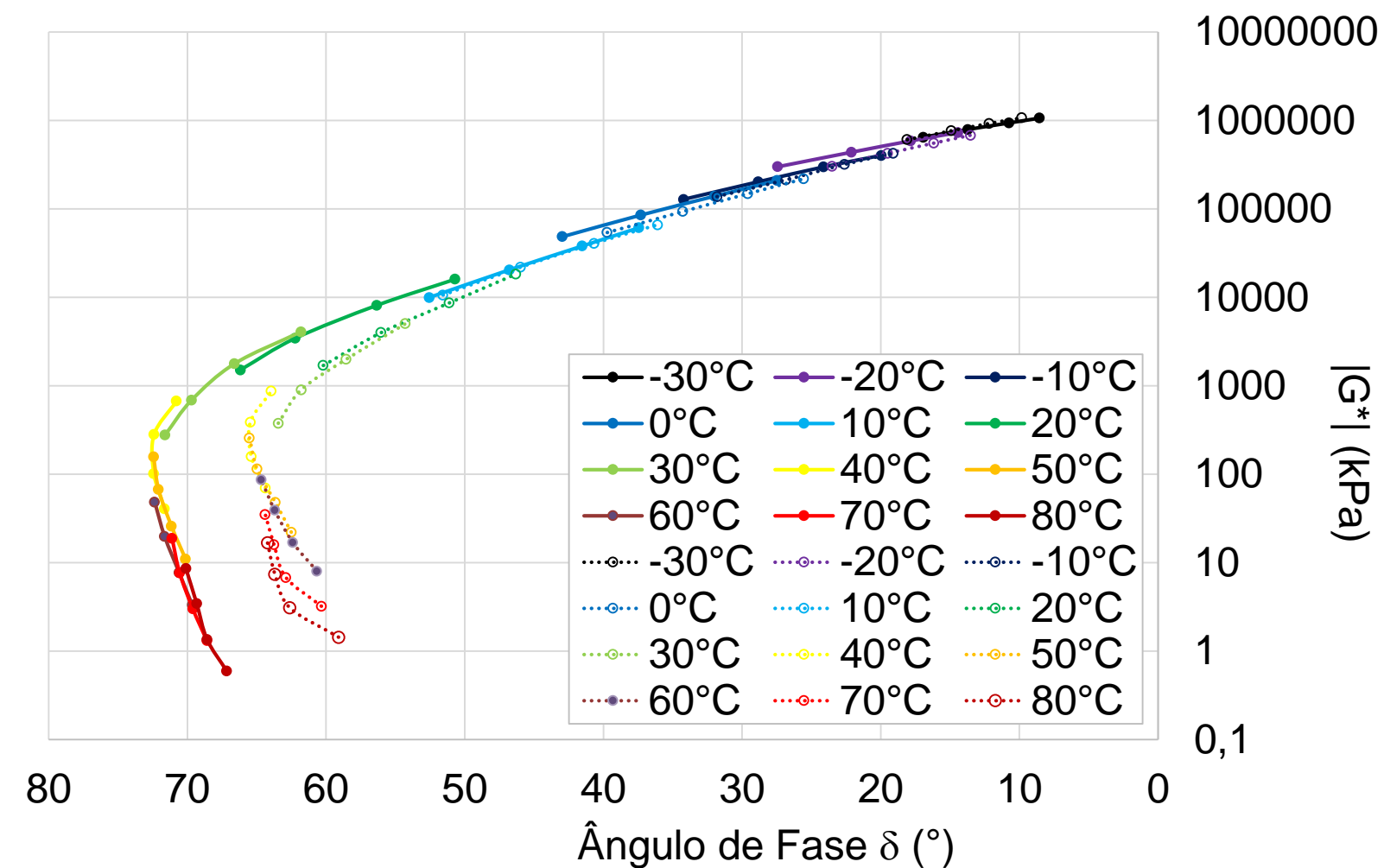
Fonte: Teixeira (2021)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

DSR: linhas contínuas (60/85 E) e tracejadas (HiMA)



Plano Cole-Cole
Dissipação de energia



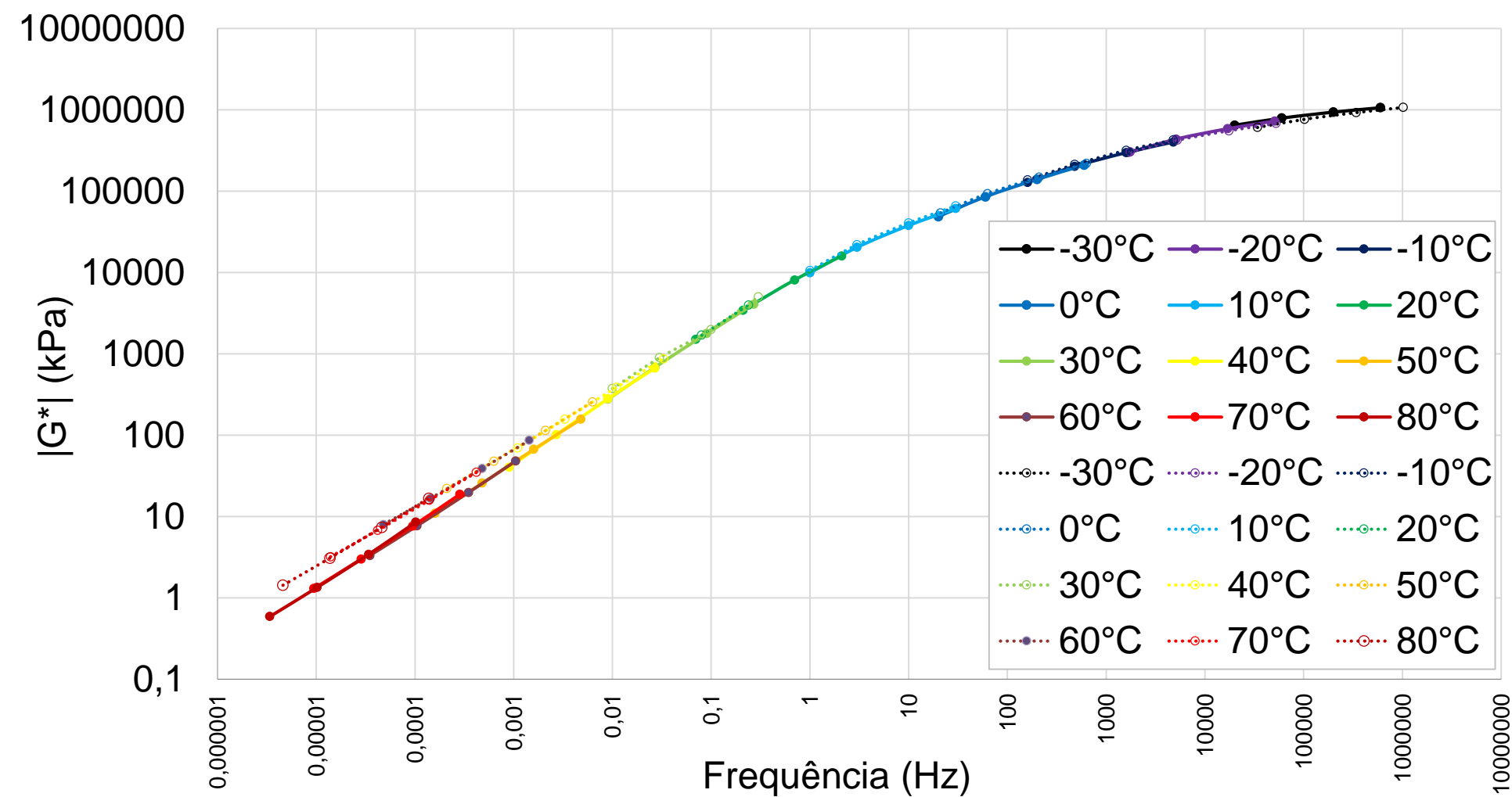
Espaço de Black
Defasagem angular - retardo

Fonte: Teixeira (2021)

[Deformação Permanente](#)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

□ DSR: linhas contínuas (60/85 E) e tracejadas (HiMA)



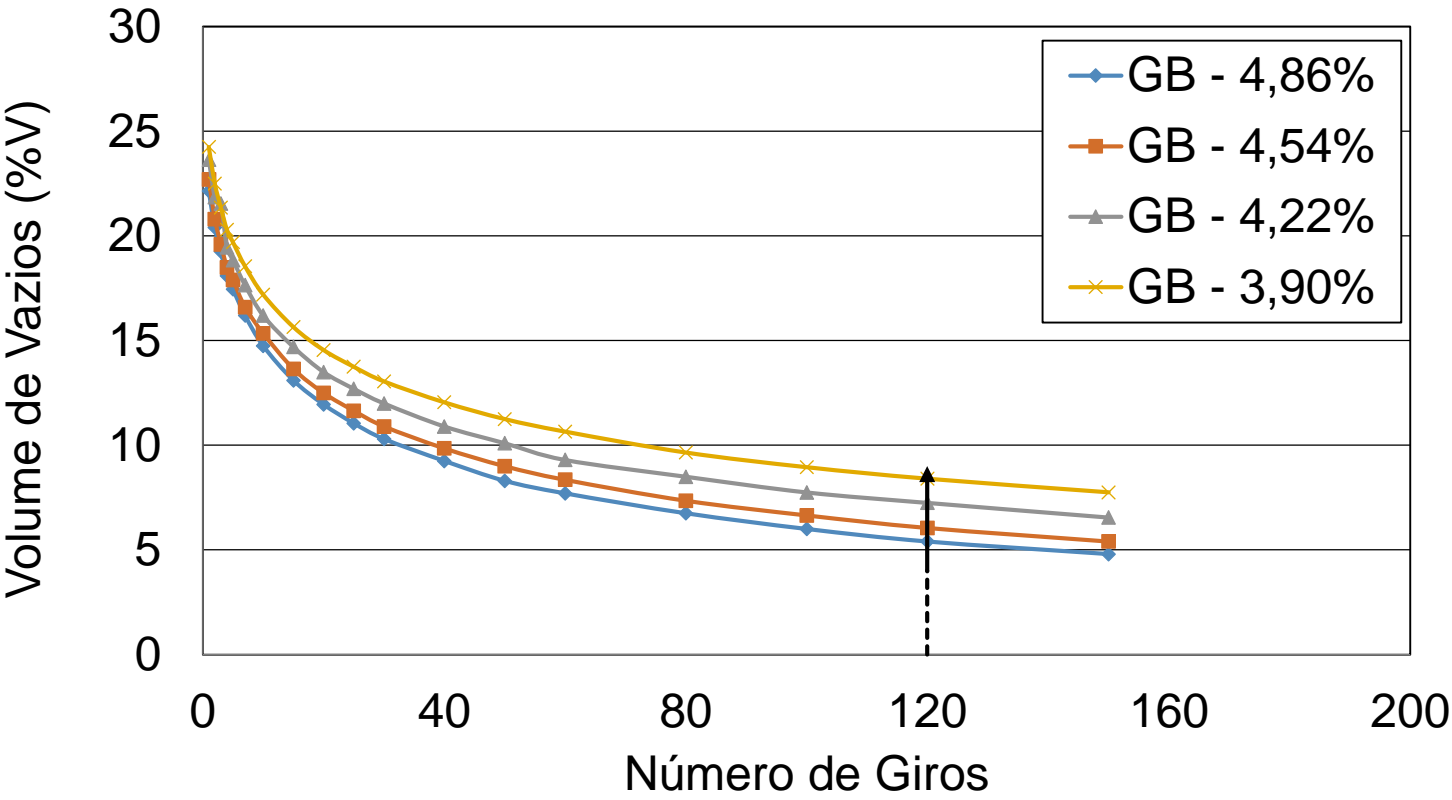
Curva de Equivalência Frequência-Temperatura
Linearidade do comportamento viscoelástico

Fonte: Teixeira (2021)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

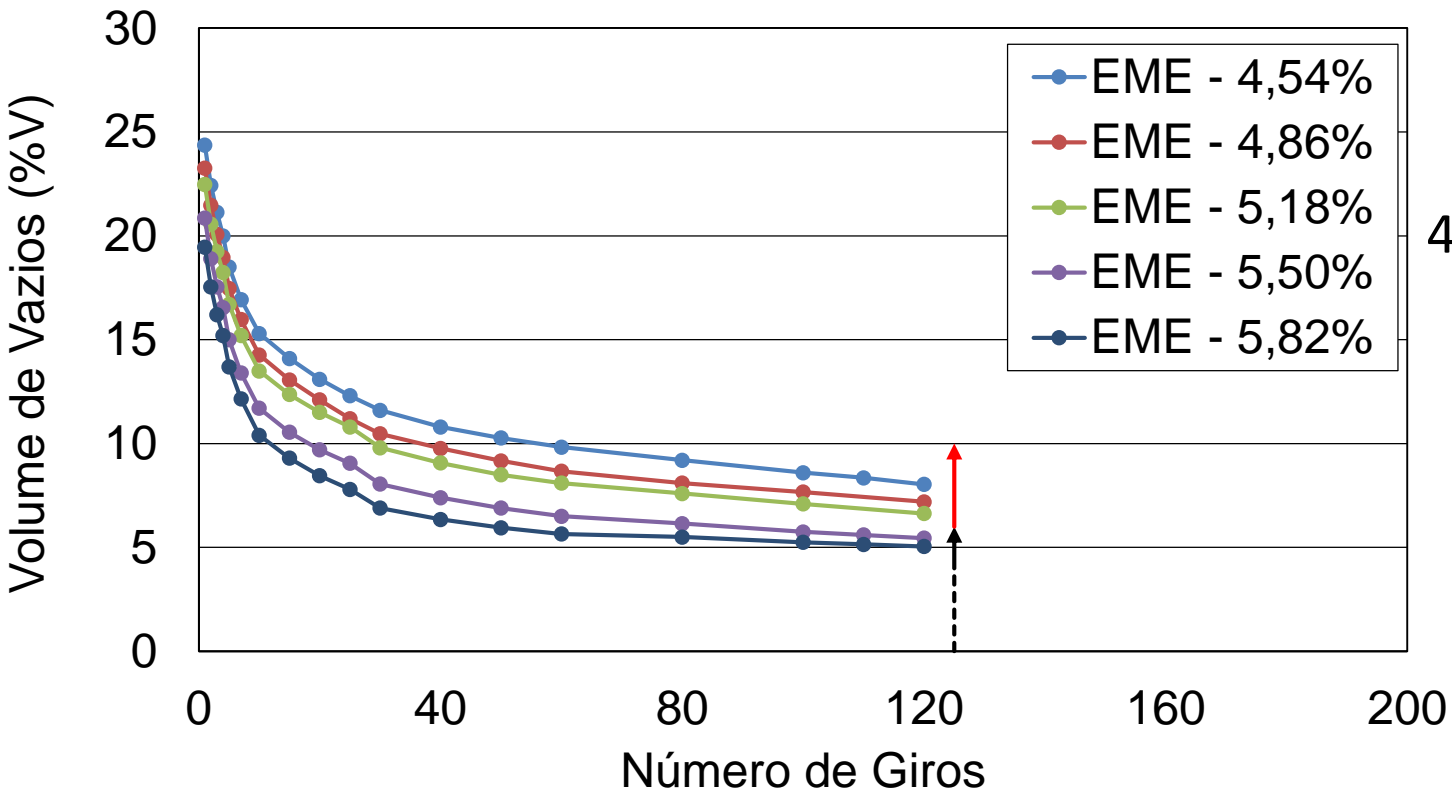
PCG: Habilidade de compactação

Teor de Ligante (%)	Número de Giros	GB ¹	EME ²
		%V	%V
3,90	120	8,4	-
4,22		7,3	-
4,54		6,1	8,0
4,86		5,4	7,2
5,18		-	6,6
5,50		-	5,5
5,82		-	5,1



GB4:
todas as
formulações

[Protocolo](#)



EME1:
4,54 %, 4,86 % e 5,18 %

EME2:
5,50 % e 5,82 %

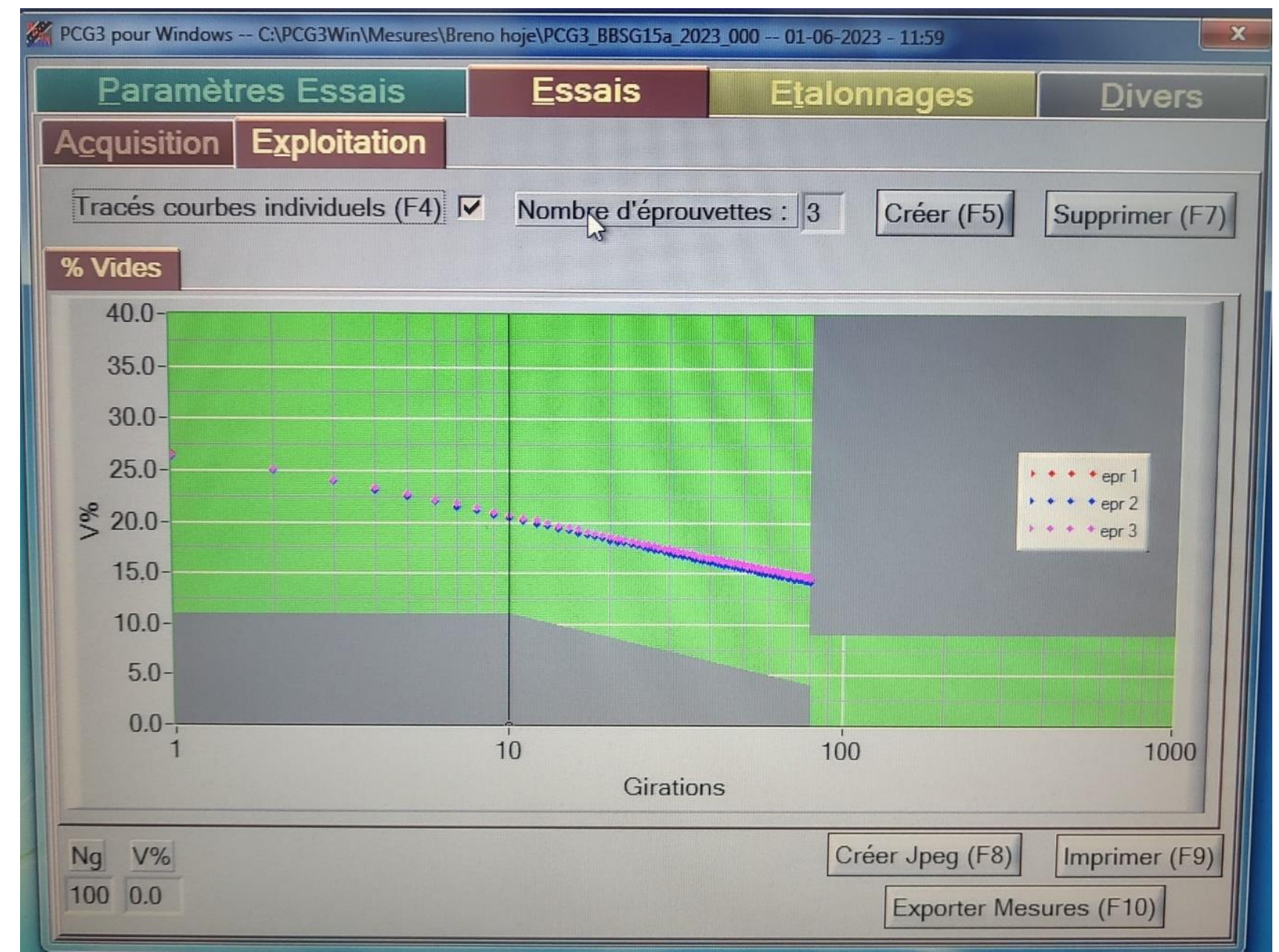
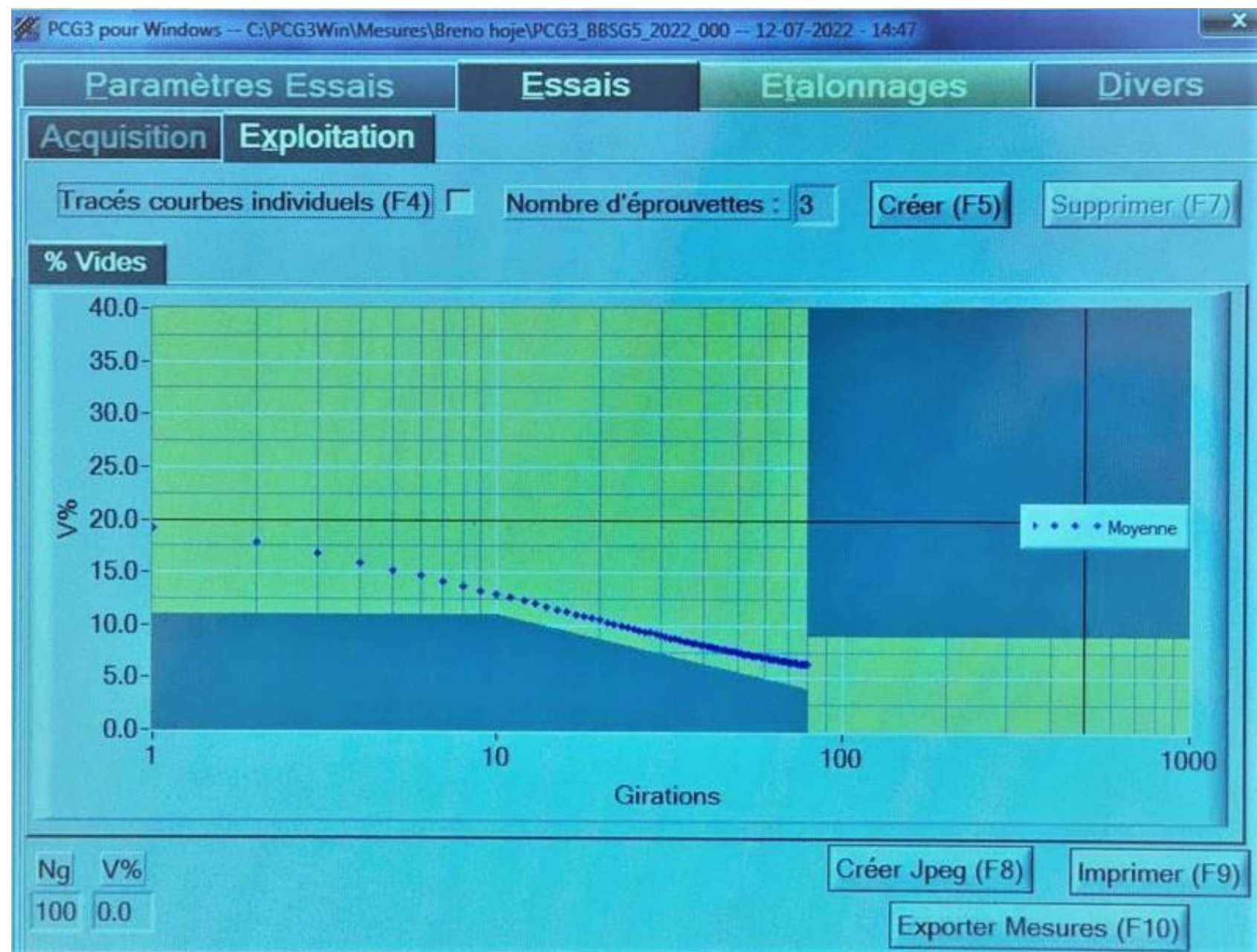
RESULTADOS E DISCUSSÕES

□ PCG: Habilidade de compactação



RESULTADOS E DISCUSSÕES

□ PCG: Habilidade de compactação

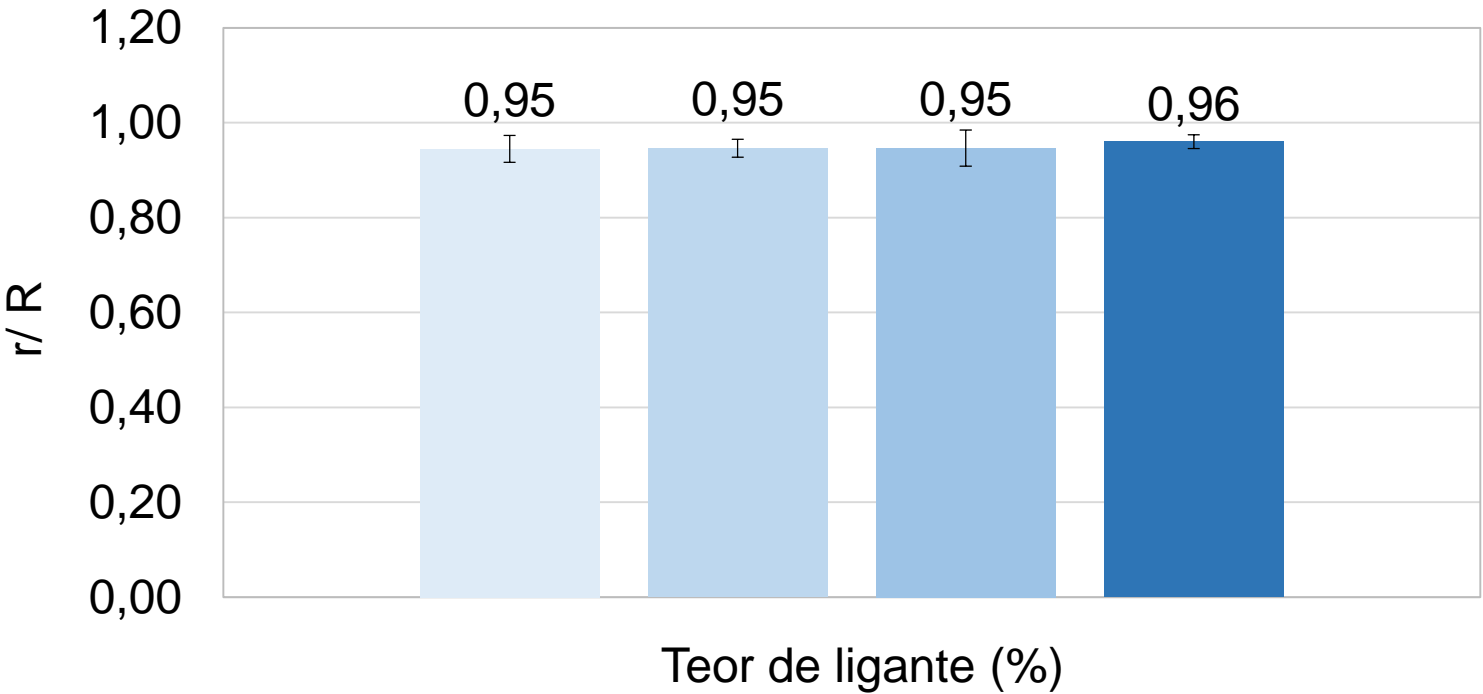


RESULTADOS E DISCUSSÕES

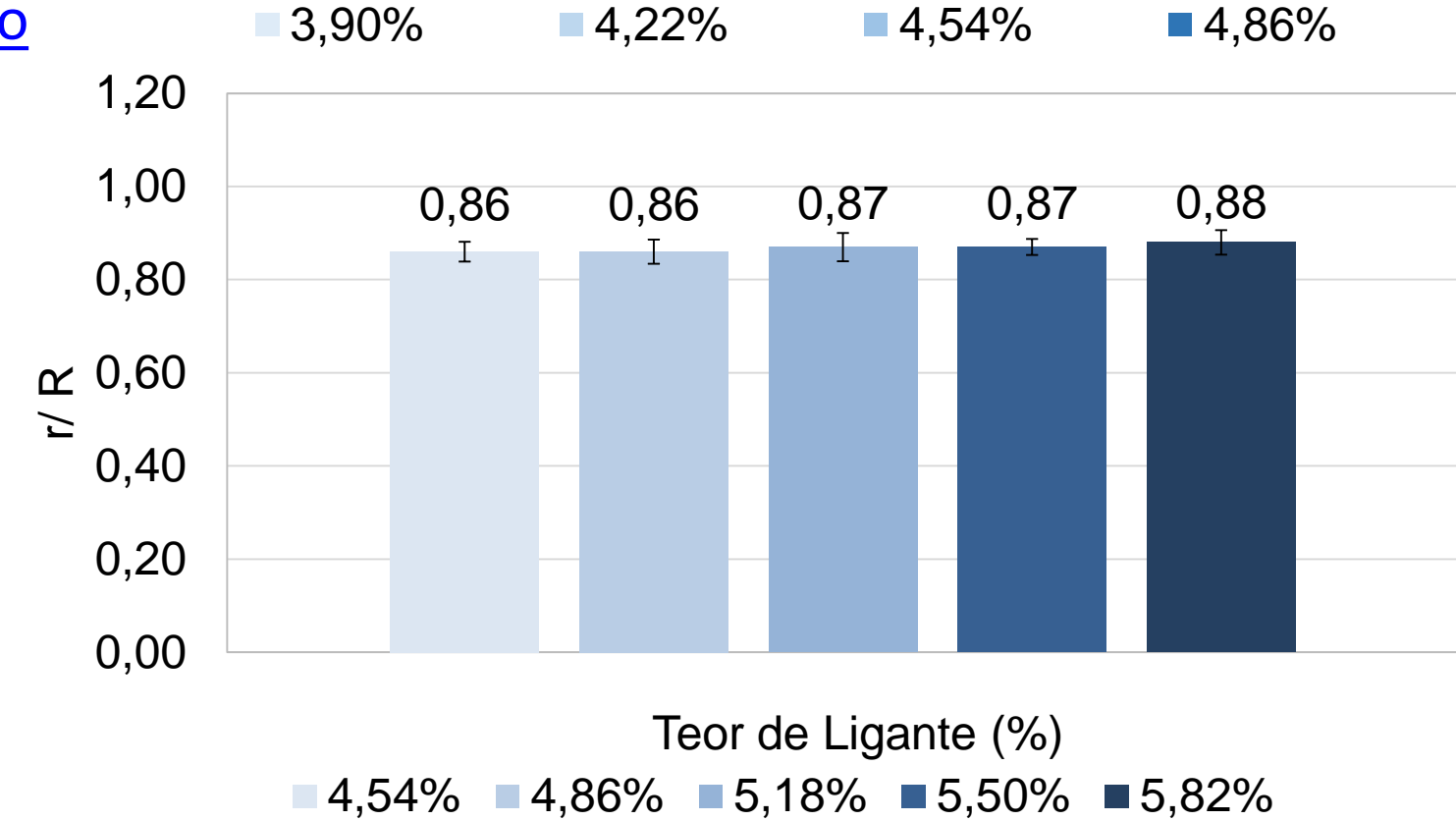
☐ Duriez: Resistência à ação da água

Teor de Ligante (%)	GB ¹	EME ²
	r/R	r/R
3,90	0,95	-
4,22	0,95	-
4,54	0,95	0,86
4,86	0,96	0,86
5,18	-	0,87
5,50	-	0,87
5,82	-	0,88

[Protocolo](#)



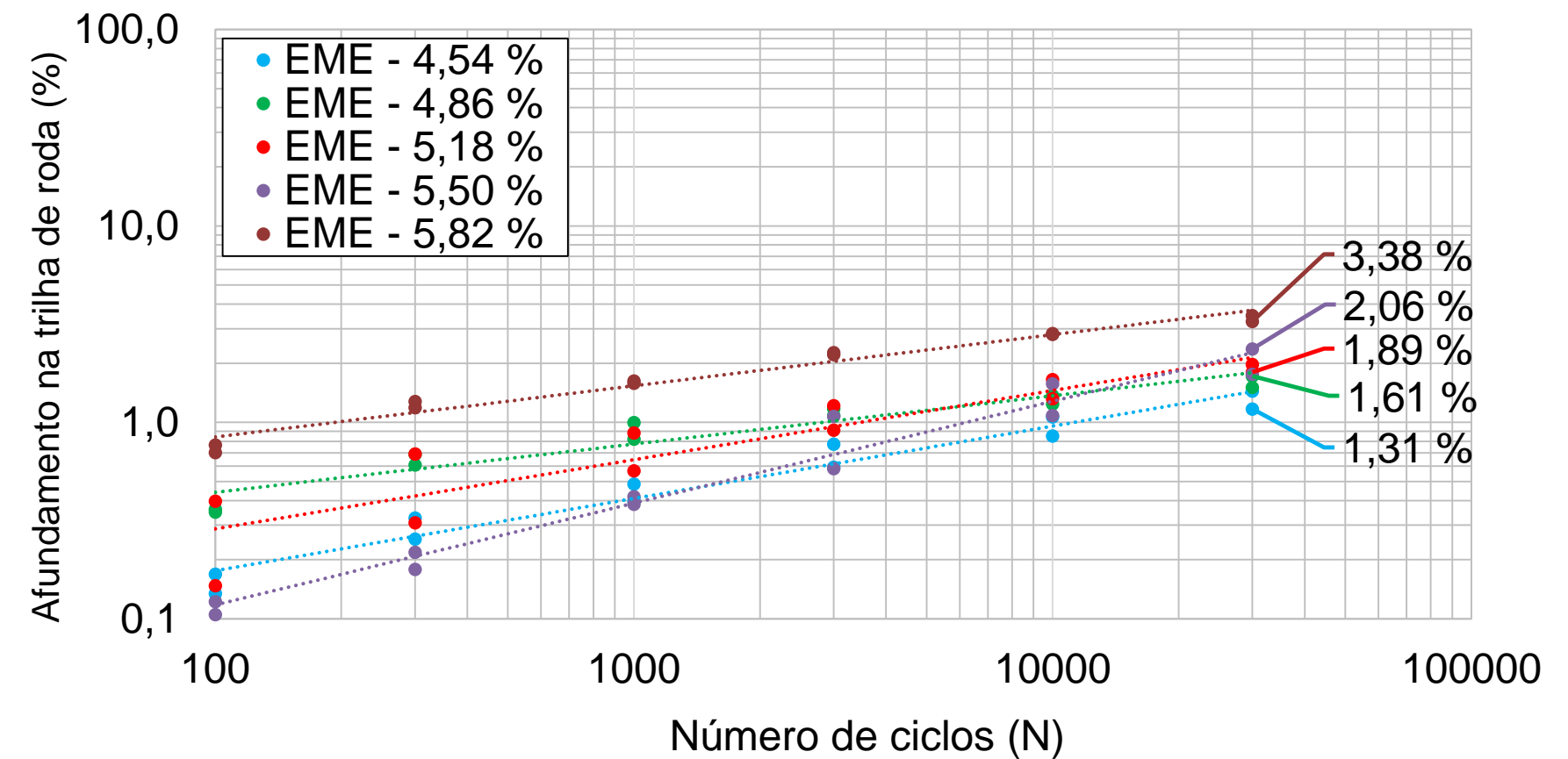
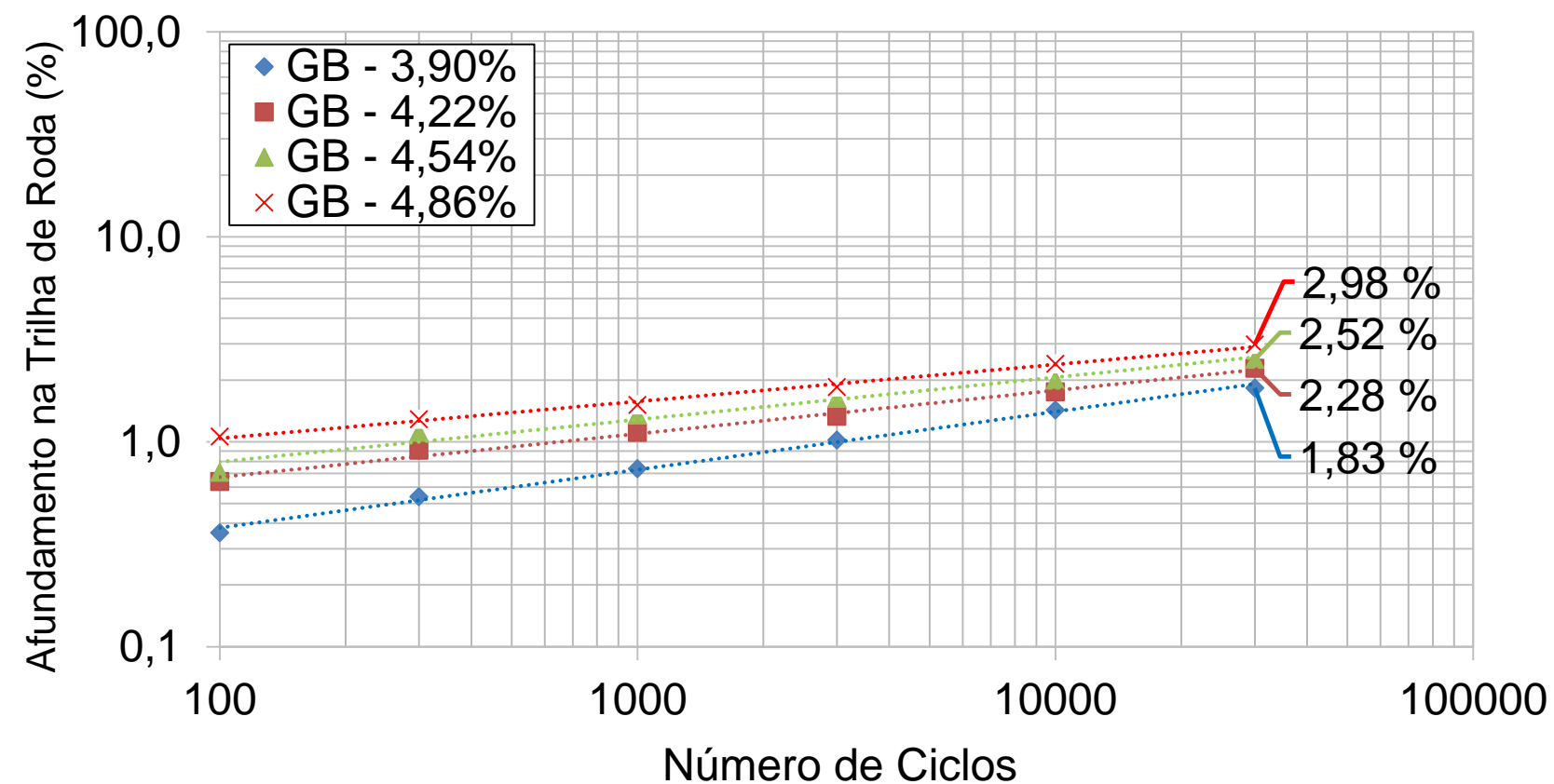
GB



EME

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Orniérage: Resistência à deformação permanente



[Protocolo](#)
[Caracterização](#)
[Reologia](#)



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Orniérage: Resistência à deformação permanente

antes



depois



GB - 4,86 %

antes



depois



EME - 5,82 %

CONCLUSÕES

- ❑ A campanha experimental realizada até este estágio indica que:
 - ❑ A matriz pétrea: em que pese ter boas propriedades no geral, dispõe de pontos críticos como a predominância mineralógica eletronegativa e um nível de lamelaridade acima do normalmente permitido pelas especificações francesas;
 - ❑ Os ligantes betuminosos selecionados dispõem de tecnologia avançada aportada em seus desenvolvimentos, bem como demonstraram excelente comportamento reológico;
 - ❑ As curvas granulométricas concebidas pela metodologia de Füller-Talbot, permitiram a formação de distribuições granulométricas com preenchimento gradual dos vazios e forte intertravamento;
 - ❑ As misturas asfálticas formuladas e testadas até o momento dispõem de elevado padrão técnico-científico, conforme demonstram os resultados apresentados, enquadrando-se nas classes mais nobres da metodologia francesa de formulação, situação que ratifica e atesta a qualidade da campanha experimental que vem sendo executada.

MENSAGEM FINAL





Agradecimentos:

Ao DNIT/IPR/DPP pela retomada do protagonismo rodoviário nacional e pelos investimentos nos laboratórios de pesquisa do Brasil!

Contatos:

Breno Salgado Barra

brenobarra@ufsc.br

(48) 9 9652-1931 – WhatsApp

<https://infraestrutura.joinville.ufsc.br/laboratorio-de-desenvolvimento-e-tecnologia-em-pavimentacao/>