

PLANO DE TRABALHO

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT

Capítulo XX do Edital 01, Lote 06, item 10 do PER

Rodovia BR 116 – Trecho São Paulo - Curitiba

Projeto 02 - SGP/ARB_02 REV.00

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA CONSERVADA E FADIGA/DEFORMAÇÃO PERMANENTE



Autopista Régis Bittencourt
Grupo OHL

RELATÓRIO FINAL

FEVEREIRO 2011



Ministério dos Transportes

Agência Nacional de Transportes Terrestres

SUMÁRIO

1	CONCESSIONÁRIA.....	3
2	TÍTULO DO PROJETO	3
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	JUSTIFICATIVA	4
4	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	4
5	ETAPAS	5
5.1	ETAPA 1 (RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO I – JUNHO DE 2010).....	5
5.2	ETAPA 2 (RELATÓRIO FINAL – JANEIRO DE 2011).....	5
5.2.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS – AGREGADOS E LIGANTES ASFÁLTICOS.....	5
5.2.2	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	10
5.2.3	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	13
5.2.4	DEFORMAÇÃO PERMANENTE	17
5.2.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – ANÁLISE DA ENERGIA DISSIPADA NO PROCESSO.....	23
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	28
6.1	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	28
6.2	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	28
6.3	DEFORMAÇÃO PERMANENTE	29
6.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E ENERGIA DISSIPADA	30
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
7	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA	33
8	REFERÊNCIAS	33
9	ANEXOS	33
9.1	ANEXO A – G'RAFICOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE	33
9.2	ANEXO B – G'RAFICOS DE CARGA X DESLOCAMENTO (ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL)	33

1 CONCESSIONÁRIA

AUTOPISTA RÉGIS BITTENCOURT

2 TÍTULO DO PROJETO

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA CONSERVADA E FADIGA/DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA AVALIAÇÃO DE RESISTÊNCIA E DURABILIDADE DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo central desta pesquisa é o de verificar uma possível previsão da resistência e da durabilidade de revestimentos asfálticos através de ensaios de simples execução. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é um exemplo onde se pode obter informação sobre a energia que foi desprendida durante o processo de ruptura do corpo-de-prova. Esta previsão deverá ser feita procurando-se uma correlação entre resultados de ensaios de comportamento mecânico com as medidas de energia obtidas através do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

2.2 Objetivos Específicos

A energia a ser determinada é a integral da curva carga x tempo resultante do ensaio de compressão confinada (Estabilidade Marshall), ou resistência a tração por compressão diametral. Estes ensaios são usuais nos laboratórios de campo das obras. A única alteração é adaptar um computador com um sistema de aquisição de dados para fazer as leituras e registros durante todo o ciclo de rompimento dos corpos de prova. Tendo em vista a realização de ensaios para obtenção da energia desprendida no processo de ruptura e de ensaios de determinação de propriedades mecânicas, têm-se como objetivos específicos:

- Verificar o comportamento de diferentes tipos de misturas asfálticas e ligantes em relação à energia desprendida durante ensaios de ruptura;
- Estudar a relação entre os diferentes tipos de mistura, tais como, SMA, CPA, Superpave e GAP para estabelecer uma hierarquia de misturas asfálticas quanto à resistência e durabilidade;

- Verificar o efeito do tamanho máximo nominal (definido como uma peneira acima da primeira peneira a reter mais de 10% de material) no comportamento mecânico das misturas estudadas.
- Avaliar qual dos ensaios apresenta melhor correlação com a energia desprendida no processo de ruptura dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, ou estabilidade Marshall.

3 JUSTIFICATIVA

A energia dissipada no processo de ruptura de um corpo-de-prova pode ser obtida através de um ensaio simples, rápido e que utiliza equipamentos laboratoriais corriqueiros, possível de ser feito em laboratórios de campo. Esta energia pode ser interpretada através das curvas de carga x deslocamento obtidas de ensaios de ruptura com carregamento monotônico, seja na estabilidade Marshall, como no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Os resultados destes ensaios dependem do tipo de ligante, graduação escolhida, entre outros aspectos como velocidade de ensaio e temperatura. A análise dos resultados mostra a dificuldade que as misturas asfálticas oferecem à ruptura. Uma vez que este é um ensaio de simples execução, tentou-se buscar uma correlação com as propriedades de resiliência, e de deformação permanente, de forma a auxiliar na seleção de misturas asfálticas. A determinação das propriedades mecânicas é feita por meio de ensaios mais complexos, envolvendo aparelhagem de custo elevado e mão-de-obra especializada. Estes são feitos em poucos laboratórios, notadamente nas universidades e centros de pesquisa.

Desta forma, o escopo desta pesquisa constou da busca de previsibilidade de comportamento dos revestimentos asfálticos usinados a quente através da obtenção da energia dissipada durante os ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este projeto constou da realização de ensaios de laboratório e análise de resultados, pelo CDT- Centro de Desenvolvimento Tecnológico (Laboratório da Paulista Infra-Estrutura, Grupo OHL) e pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP. No CDT foram realizadas as dosagens das misturas asfálticas e na EPUSP foram realizados os ensaios de deformação permanente, módulo de resiliência, além de resistência à tração por compressão diametral em duas temperaturas de ensaio (5°C e 25°C). Os ensaios realizados no

LTP/EPUSP basearam-se em especificações da AASHTO, AFNOR e do DNIT e os procedimentos seguidos pelo CDT constaram de especificações internas.

5 ETAPAS

5.1 ETAPA 1 (Relatório de Acompanhamento I – Junho de 2010)

No relatório de acompanhamento I constaram os resultados preliminares dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral em duas temperaturas (para avaliação da energia dissipada) e de deformação permanente por meio de simulador de tráfego tipo LCPC de uma mistura asfáltica a quente, para constituir CAPA ou Camada de Rolamento, na Faixa 2 – SPV 12,5 – curva granulométrica Superpave, com diâmetro nominal máximo de 12,5mm. O projeto de dosagem da mistura selecionada foi realizado pela OHL-Laboratório da Paulista Infraestrutura. Essa etapa inicial foi relevante para a definição das metodologias de ensaio e análise de resultados.

5.2 ETAPA 2 (Relatório Final – Janeiro de 2011)

Para elaboração dos segundo relatório, dosages de misturas asfálticas com diferentes granulometrias e ligantes asfálticos foram recebidas do CDT para realização dos ensaios mecânicos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP, bem como análise dos dados obtidos, conforme descrito nos subitens a seguir.

5.2.1 Seleção dos materiais – agregados e ligantes asfálticos

O presente estudo utilizou agregados provenientes da pedreira Jorcal (brita 1, pedrisco e pó-de-pedra), cal CH “I”, fibra de celulose (Interfibe) e 4 ligantes asfálticos (CAP 30/45, ligante asfáltico modificado por polímero SBS 60/85, ligante asfáltico modificado por borracha e ligante asfáltico modificado por RET). Oito distribuições granulométricas (3 Superpave, 2 SMAs, 1 Gap Graded, e 2 CPAs) foram compostas com os agregados acima mencionados, conforme ilustrado nas Figuras 1 a 8.

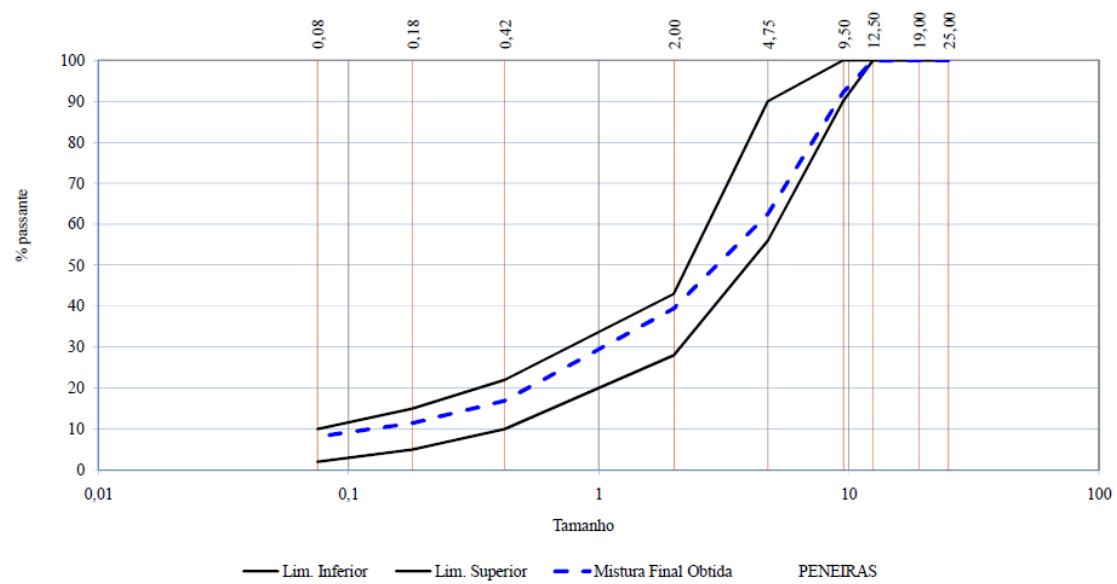


Figura 1. Distribuição granulométrica SPV 9,5mm

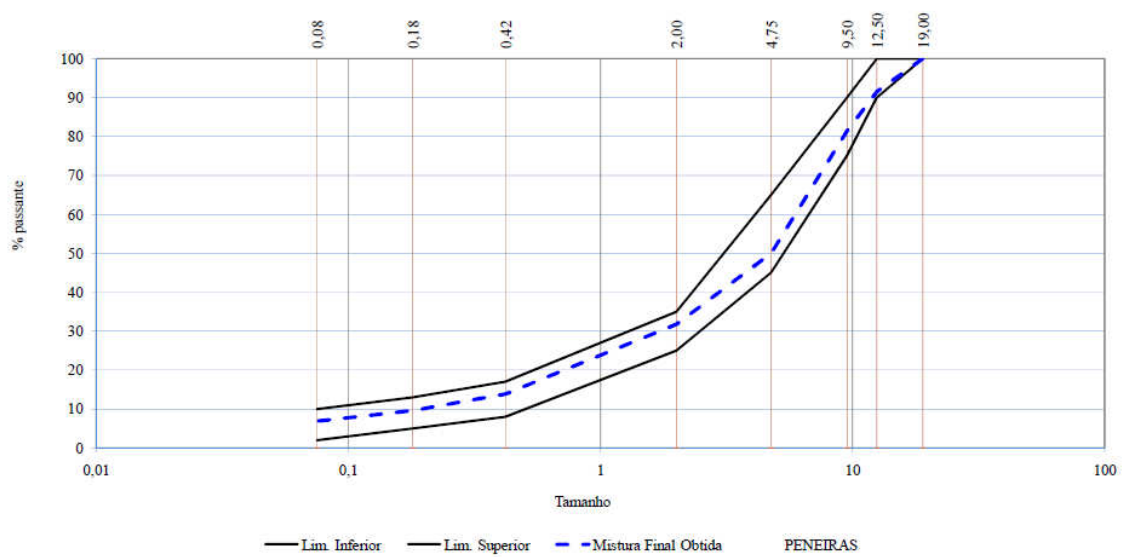


Figura 2. Distribuição granulométrica SPV 12,5mm

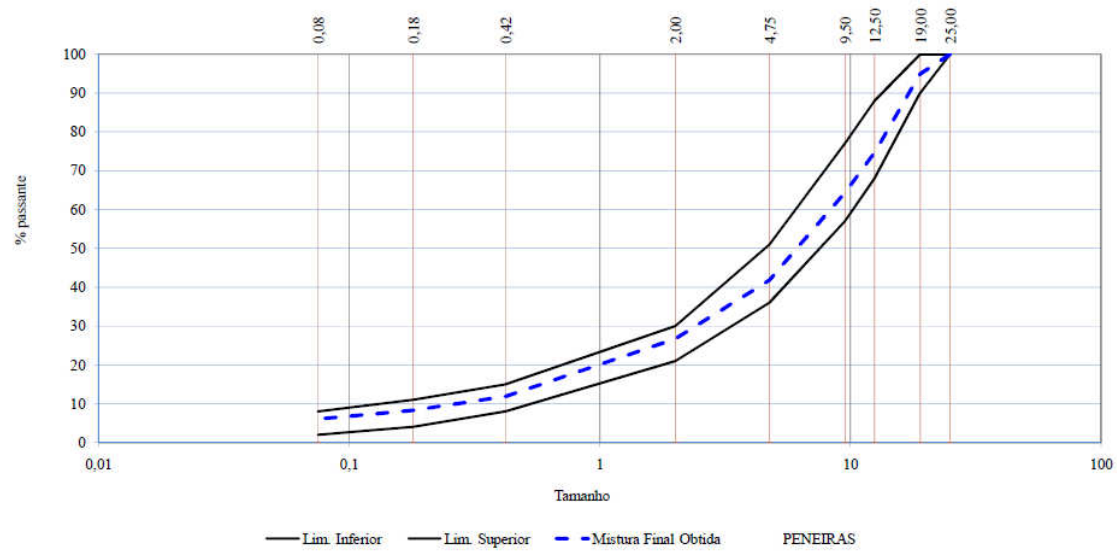


Figura 3. Distribuição granulométrica SPV 19mm

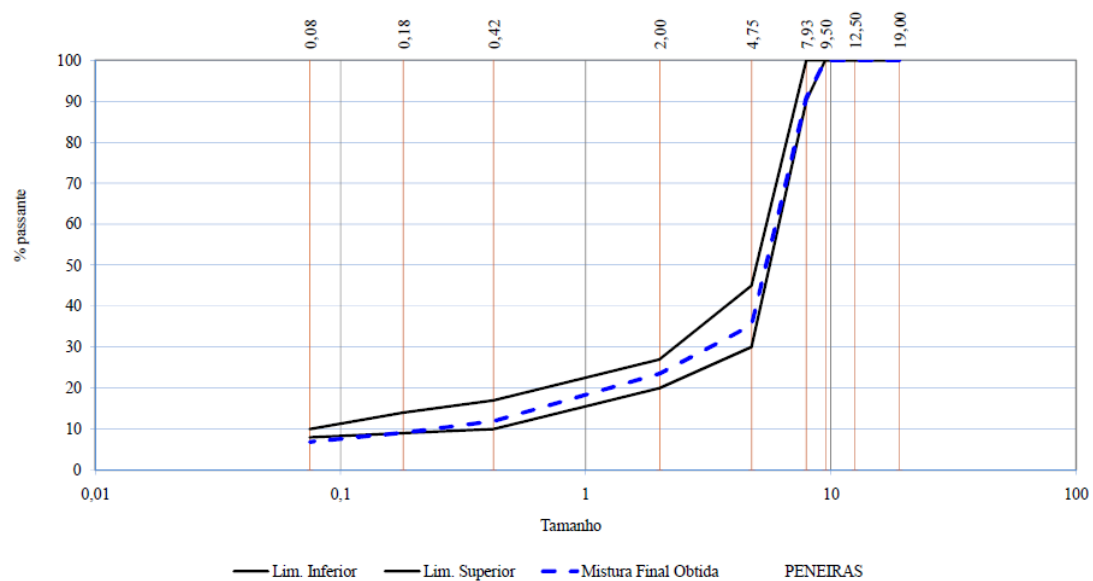


Figura 4. Distribuição granulométrica SMA 8S

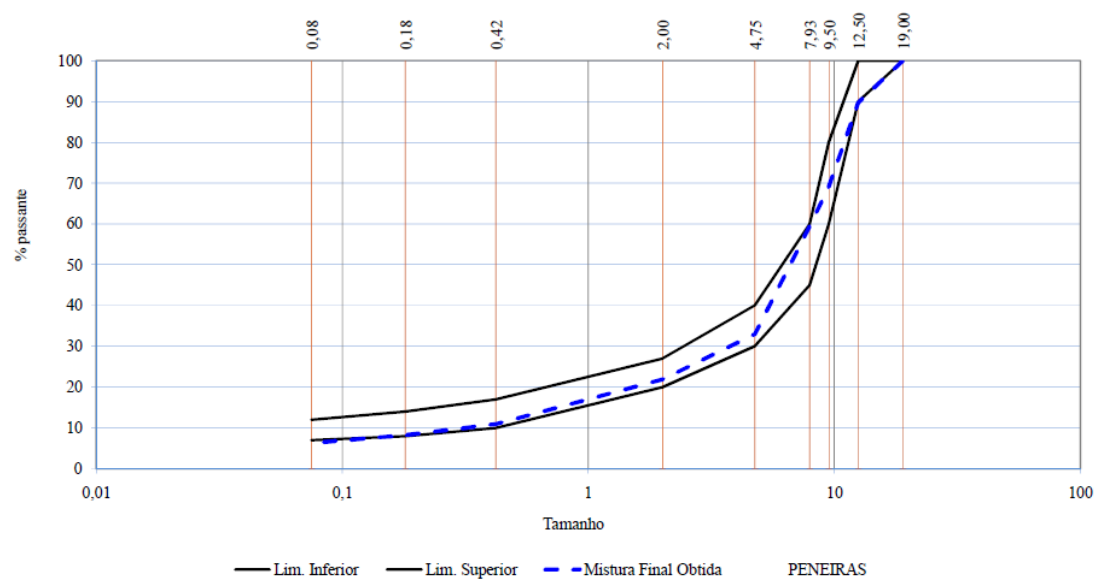


Figura 5. Distribuição granulométrica SMA 11S

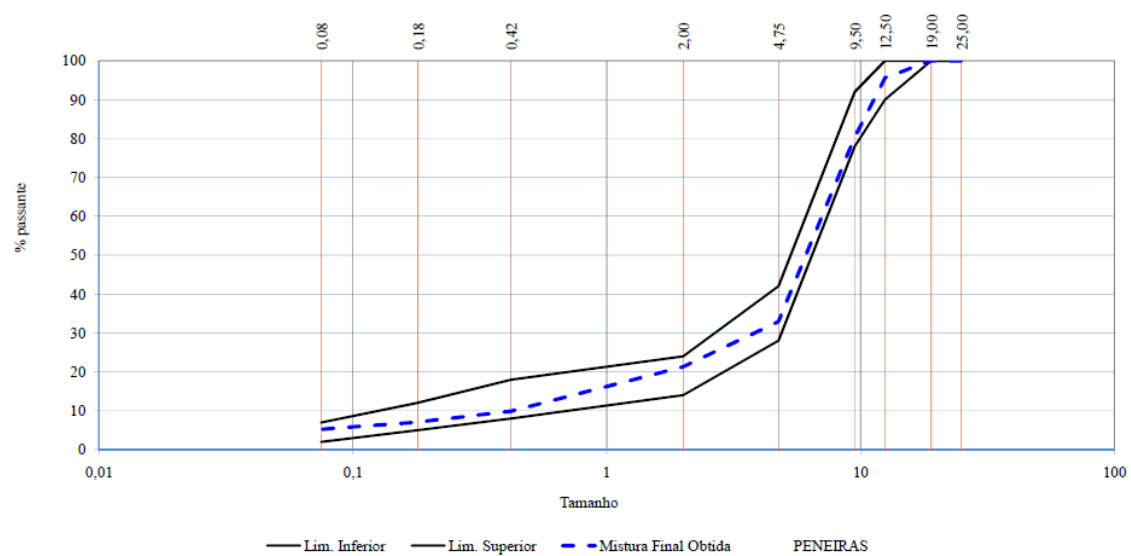


Figura 6. Distribuição granulométrica GAP 12,5mm

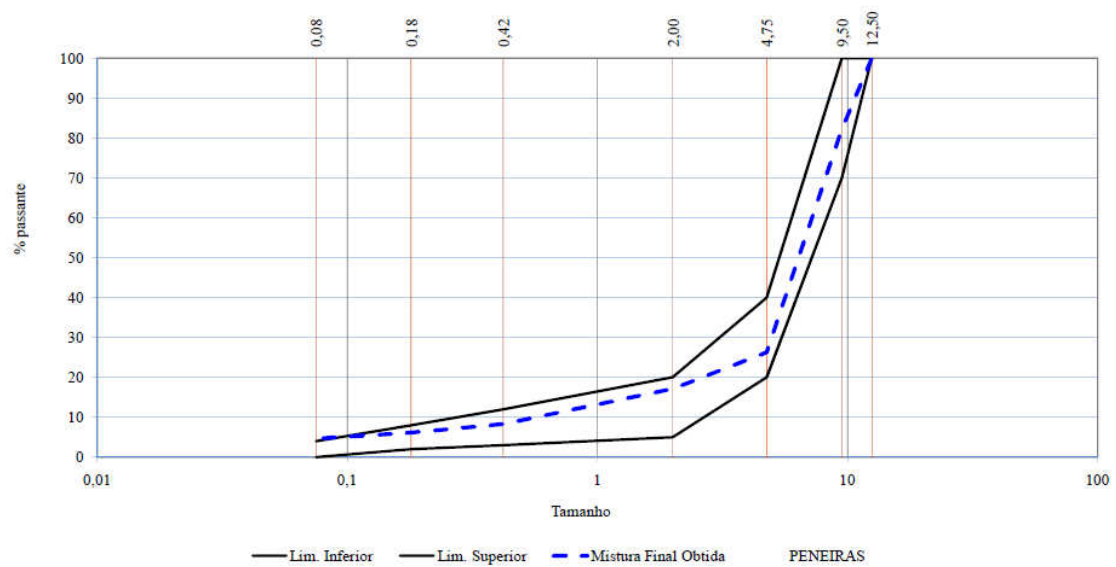


Figura 7. Distribuição granulométrica CPA 9,5mm

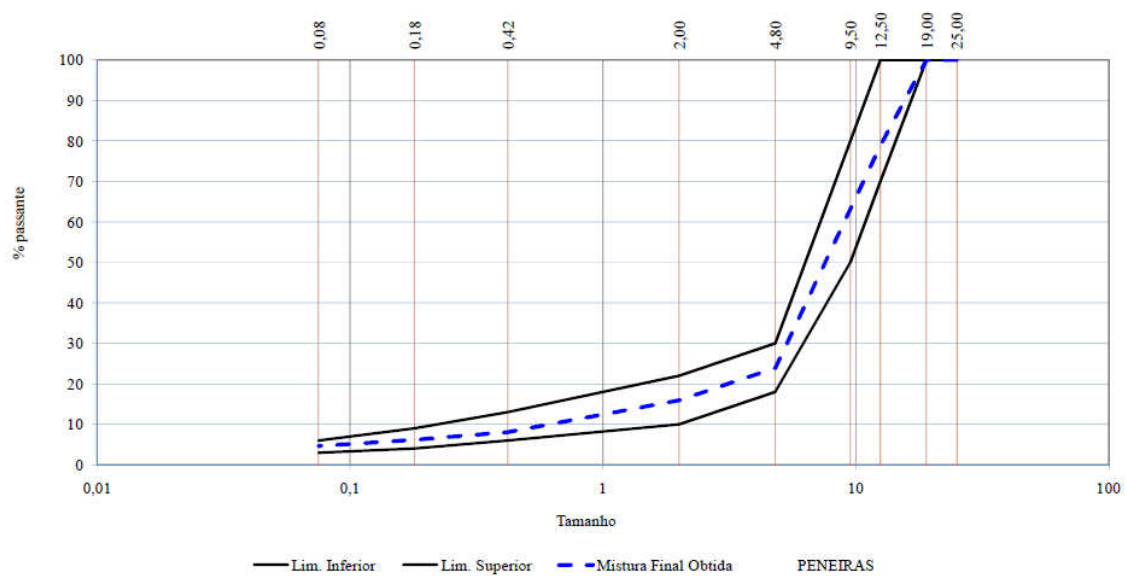


Figura 8. Distribuição granulométrica CPA 12,5mm

A Figura 9 apresenta as nomenclaturas adotadas para as 32 misturas asfálticas, a fim de facilitar a apresentação dos dados obtidos nos parâmetros mecânicos.

	CAP 30/45	SBS 60/85	BORRACHA	RET
SPV9,5mm	A	I	Q	Y
SPV12,5mm	B	J	R	Z
SPV19mm	C	K	S	AA
SMA8S	D	L	T	BB
SMA11S	E	M	U	CC
GAP12,5mm	F	N	V	DD
CPA9,5mm	G	O	W	EE
CPA12,5mm	H	P	X	FF

Figura 9. Nomenclatura das misturas estudadas

5.2.2 Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das 32 misturas asfálticas foi realizada pelo Laboratório da Paulista Infraestrutura (OHL Brasil) de acordo com a especificação técnica para projeto de misturas asfálticas a quente OHL-ET-001. Os teores de projeto das misturas encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Teor de projeto das misturas estudadas (fornecido pelo CDT – OHL)

	CAP 30/45	SBS 60/85	BORRACHA	Elvaloy
SPV9,5mm	4,9%	4,9%	5,9%	5,3%
SPV12,5mm	4,7%	5,0%	6,1%	5,0%
SPV19mm	4,5%	5,0%	5,8%	4,7%
SMA8S	6,9%	7,3%	8,6%	7,6%
SMA11S	6,2%	6,5%	8,1%	6,6%
GAP12,5mm	5,6%	6,0%	6,5%	5,9%
CPA9,5mm	5,1%	5,5%	5,4%	4,3%
CPA12,5mm	4,9%	5,0%	5,0%	4,1%

Os dados de estabilidade Marshall obtidos durante as dosagens foram enviados ao LTP-EPUSP para que fosse feita a análise da energia dissipada durante o ensaio (para os diversos teores de asfalto usados na dosagem). A prensa em que o ensaio de estabilidade é executado só permite a coleta dos dados de carga e deslocamento até logo após a ruptura da amostra (onde é registrada a perda de estabilidade). Desta forma, a determinação da energia dissipada no ensaio foi calculada considerando apenas a área até o ponto de carga máxima. As Figuras 10 a 13 apresentam os resultados de todos os CPs testados na fase de dosagem, para os quatros diferentes ligantes asfálticos.

O padrão de dosagem Marshall preconiza 5 teores de CAP e um mínimo de 3 Cps por teor (conforme realizado pelo CDT). Os dados enviados à USP foram para a complementação da análise (cálculo de energia dissipada).

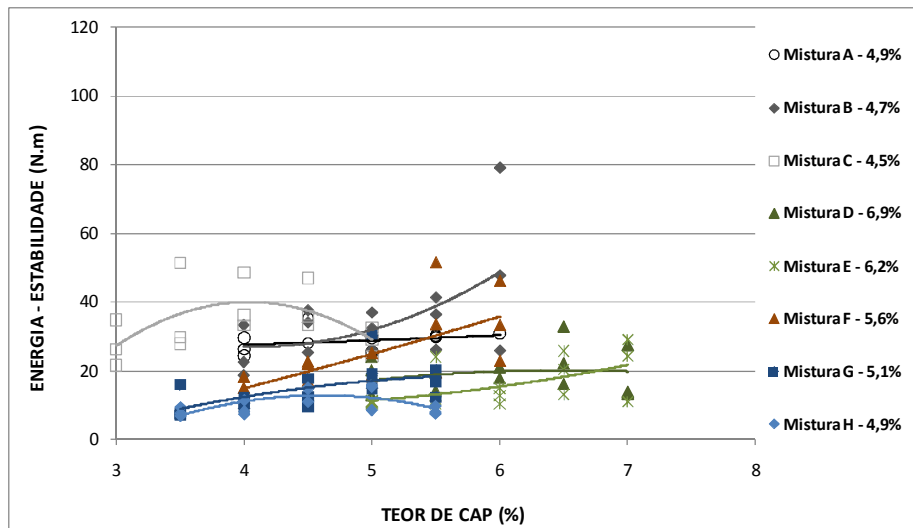


Figura 10. Energia dissipada no ensaio de estabilidade Marshall (até Pmax) – Misturas preparadas com o CAP 30/45

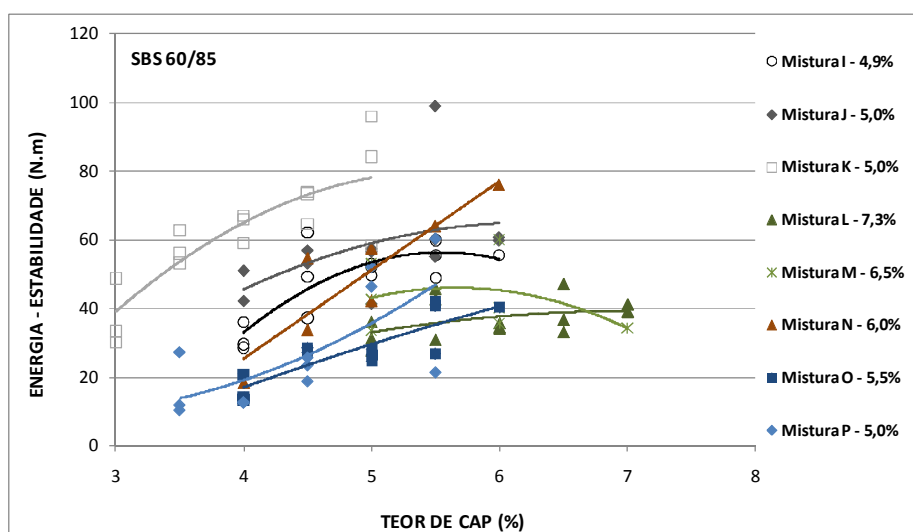


Figura 11. Energia dissipada no ensaio de estabilidade Marshall (até Pmax) – Misturas preparadas com o ligante modificado por polímero SBS 60/85

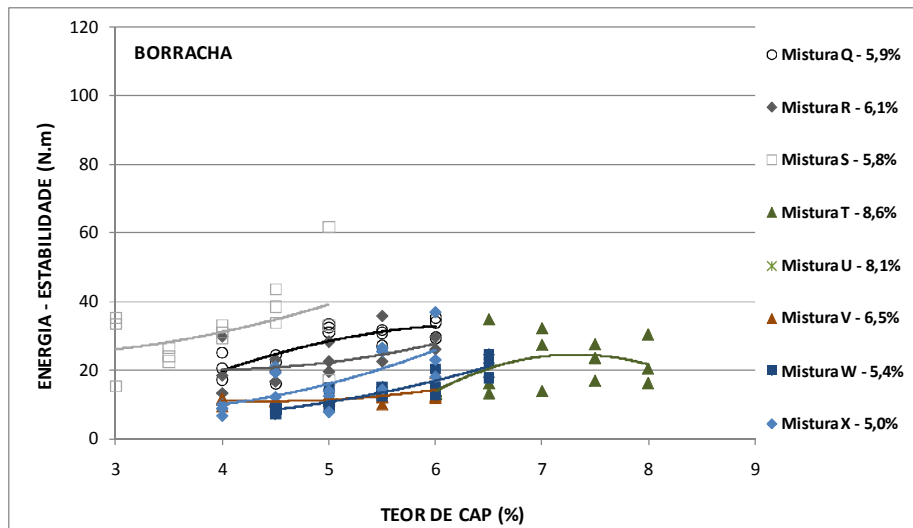


Figura 12. Energia dissipada no ensaio de estabilidade Marshall (até Pmax) – Misturas preparadas com o ligante modificado por BORRACHA

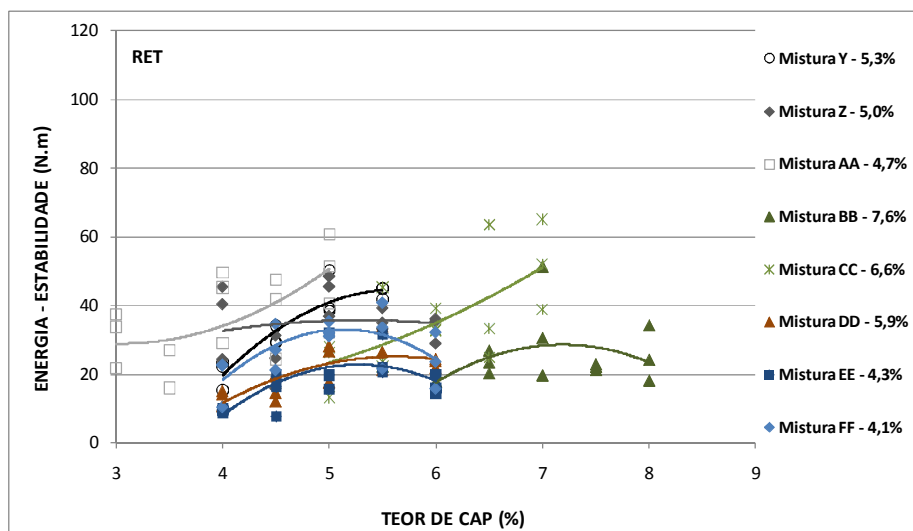


Figura 13. Energia dissipada no ensaio de estabilidade Marshall (até Pmax) – Misturas preparadas com o ligante modificado por RET

5.2.3 Módulo de resiliência (MR)

O MR de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral de uma amostra cilíndrica, e a deformação específica recuperável (ϵ_r) correspondente à tensão aplicada, a uma determinada temperatura (T):

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \right)_T$$

A determinação do MR para misturas asfálticas pode ser feita, basicamente, através dos ensaios de compressão diametral (utilizada neste projeto de pesquisa) e compressão uniaxial, como forma de medir a rigidez das misturas. A norma brasileira não distingue MR instantâneo de MR total, como é feito na norma americana (ASTM D 4123-82), porém adotou-se para o presente estudo a determinação do MR instantâneo, que é calculado considerando a deformação recuperável que ocorre instantaneamente durante a fase de descarregamento do ciclo. A Figura 14 ilustra um exemplo dos gráficos obtidos no ensaio.

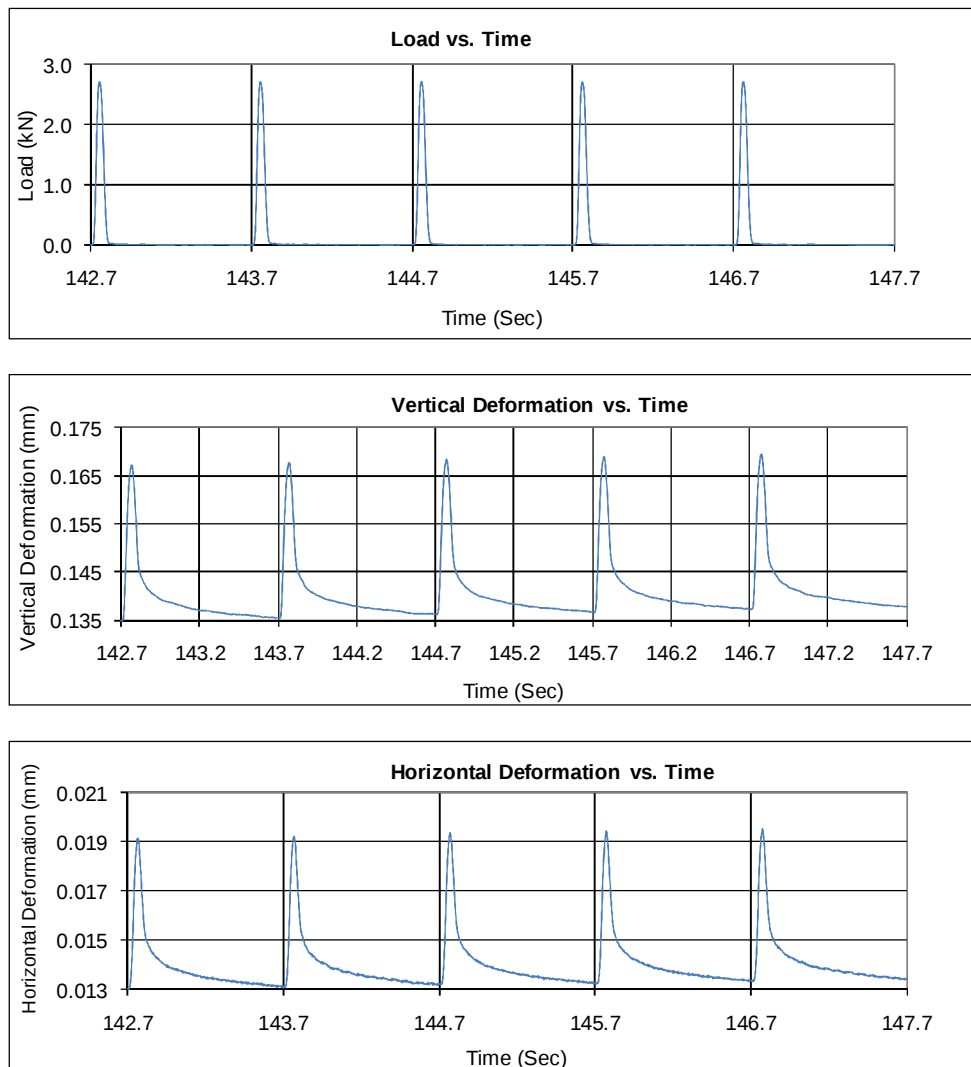


Figura 14. Gráficos gerados durante o ensaio de módulo de resiliência na prensa MTS

O MR foi determinado em CPs moldados em laboratório (diâmetro de $10 \pm 0,02\text{cm}$ e altura de $6,35 \pm 0,13\text{cm}$) a 25°C . As tensões empregadas nos ensaios levaram em consideração o valor de tensão do ensaio de RT, com percentual variando entre 10 e 15%, a depender da mistura, devido a sensibilidade dos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*). A Figura 15 ilustra a prensa MTS, localizada no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP, utilizado na realização dos ensaios e as Figuras 16 a 19 apresentam os resultados obtidos nos ensaios.



Figura 15. Prensa MTS do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP

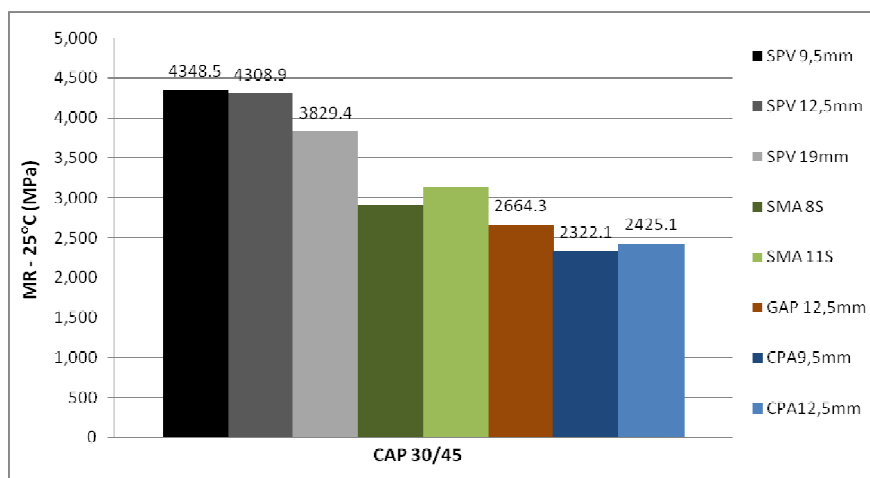


Figura 16. Resultados de módulo de resiliência das misturas preparadas com o CAP 30/45

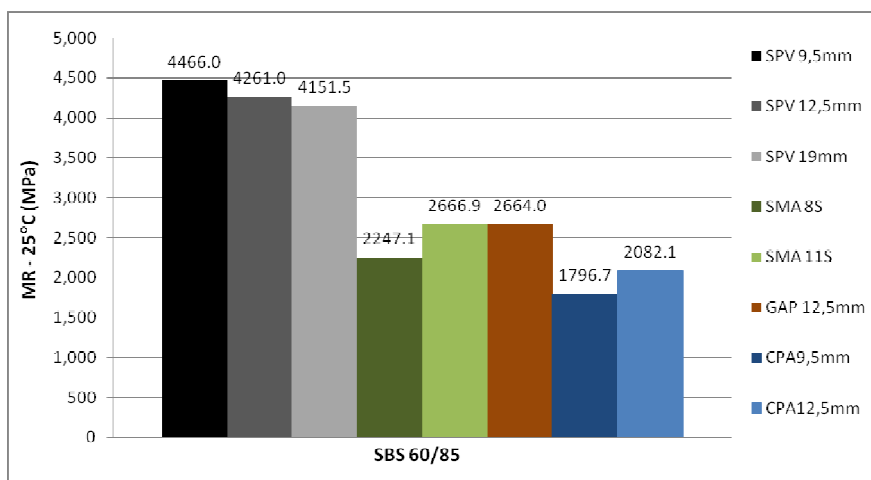


Figura 17. Resultados de módulo de resiliência das misturas preparadas com ligante modificado por SBS 60/85

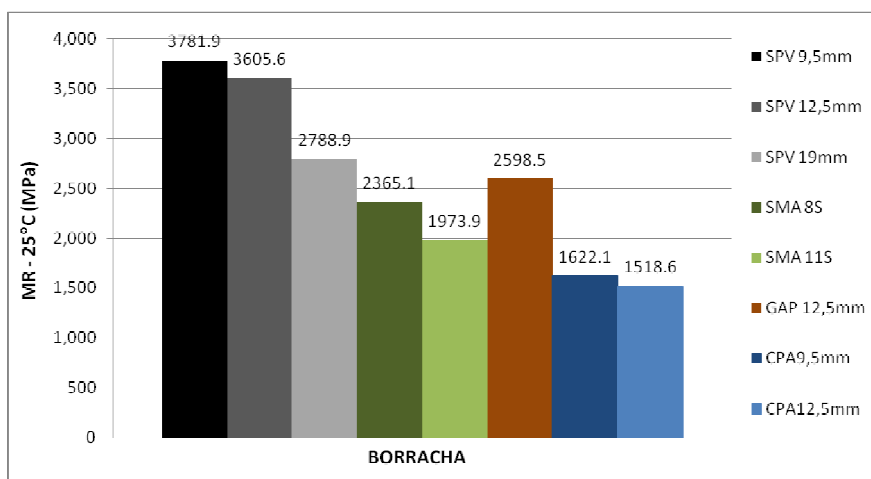


Figura 18. Resultados de módulo de resiliência das misturas preparadas com ligante modificado por borracha

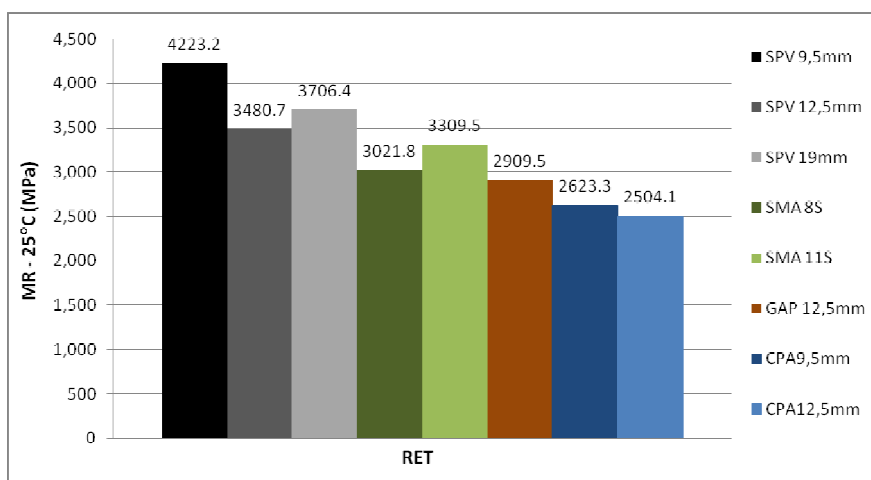


Figura 19. Resultados de módulo de resiliência das misturas preparadas com ligante modificado por RET

5.2.4 Deformação Permanente

Após a usinagem das misturas asfálticas seguindo o projeto de dosagem, estas foram levadas à mesa compactadora francesa LCPC (idealizada pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* da França) para a moldagem das placas (corpos-de-prova utilizados no ensaio de deformação permanente).

A mesa compactadora LCPC compacta a mistura asfáltica por rolagem (Figura 20), através de uma sequência de passagens de um pneu padronizado, com pressão variando entre 0,3 e 0,6MPa (3 e 6 bar), segundo especificação europeia EN 12697-33 (2003) (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 12697-33: Mélange bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. Version française. Bruxelles, 2003).



Figura 20. Moldagem de uma placa na mesa compactadora francesa

Foi confeccionado um par de placas para cada mistura asfáltica investigada para serem submetidos ao ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego francês do tipo LCPC. Os corpos-de-prova para os ensaios de deformação permanente consistem de placas com 50 mm de espessura por 180 mm de largura e 500 mm de comprimento.

Após a moldagem e esfriamento do par de placas, estas foram submetidas ao simulador de tráfego tipo LCPC (equipamento concebido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) para a determinação do afundamento em trilha de roda, ou deformação permanente (Figura 21), segundo a norma europeia EN 12697-22 (2003). (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 12697-22 : Mélanges bitumineux : Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud : Partie 22 : Essai d'orniérage. Version française. Bruxelles, 2003).



Figura 21. Simulador de tráfego LCPC

Este equipamento é composto de um eixo com dois pneus (um para cada placa), com pressão regulável normalizada em 6bar para este ensaio, e carga regulável normalizada em 5.000 N. Estes pneus passam em contato direto sobre as placas em ciclos (cada um correspondente a uma ida e uma volta), a uma frequência de 1 Hz, gerando afundamentos progressivos. Este teste é normalmente levado até 30.000 ciclos a uma temperatura de 60°C, a fim de impor a condição mais desfavorável e acelerar a obtenção dos resultados. O ensaio deve ser interrompido para deformações que excedam 15%. Antes de ser iniciada a simulação de tráfego é lida a condição inicial (ciclo zero) e, posteriormente ao longo do ensaio são medidos os afundamentos após 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos.

Sob estas condições é possível prever uma situação de deformação permanente que ocorreria após cerca de alguns anos em campo, dependendo das condições de tráfego, número de solicitações e clima a que o pavimento estará sujeito. Segundo as recomendações européias, a porcentagem máxima de afundamento em trilha de roda em revestimentos asfálticos sujeitos a tráfego pesado deve ser de 5% após 30.000 ciclos no simulador de tráfego francês.

No Brasil tem-se procurado estabelecer o limite de 5% aos 30.000 ciclos para concretos asfálticos submetidos a tráfego pesado para as condições prevalecentes no país, devido ao clima ser desfavorável quanto à deformação permanente. Este limite vem sendo utilizado desde 1994 no LTP-EPUSP, época na qual os primeiros testes foram feitos com o simulador de maneira pioneira no Brasil.

Todos os gráficos resultantes do ensaio de deformação permanente encontram-se apresentados no Anexo A deste relatório. Vale salientar que as misturas CPA não foram submetidas ao ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego, uma vez que esse tipo de mistura não possui função estrutural no sistema de camadas do pavimento. As Figuras 22 a 25 apresentam os resultados de deformação permanente agrupados por tipo de ligante asfáltico.

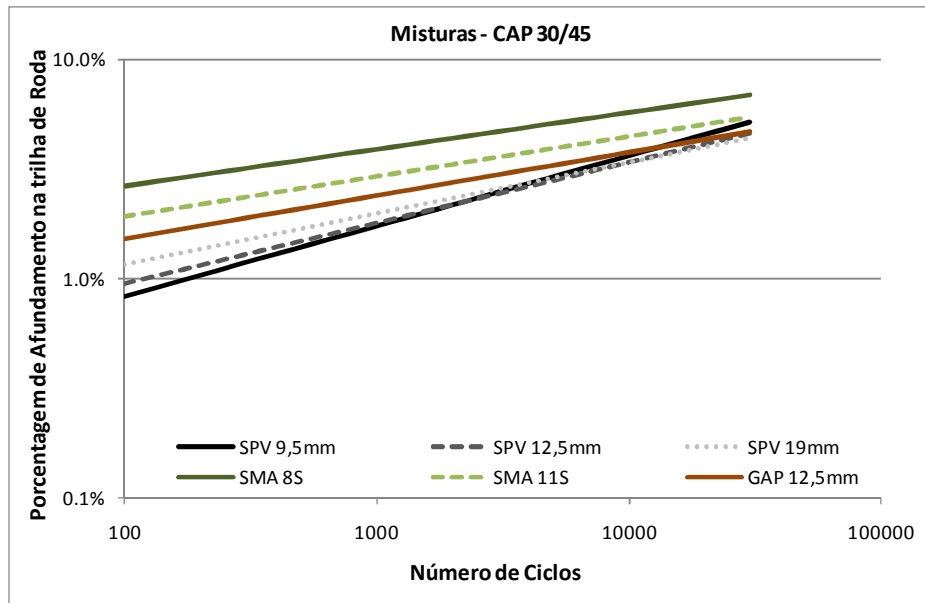


Figura 22. Resultados de deformação permanente das misturas preparadas com o CAP 30/45

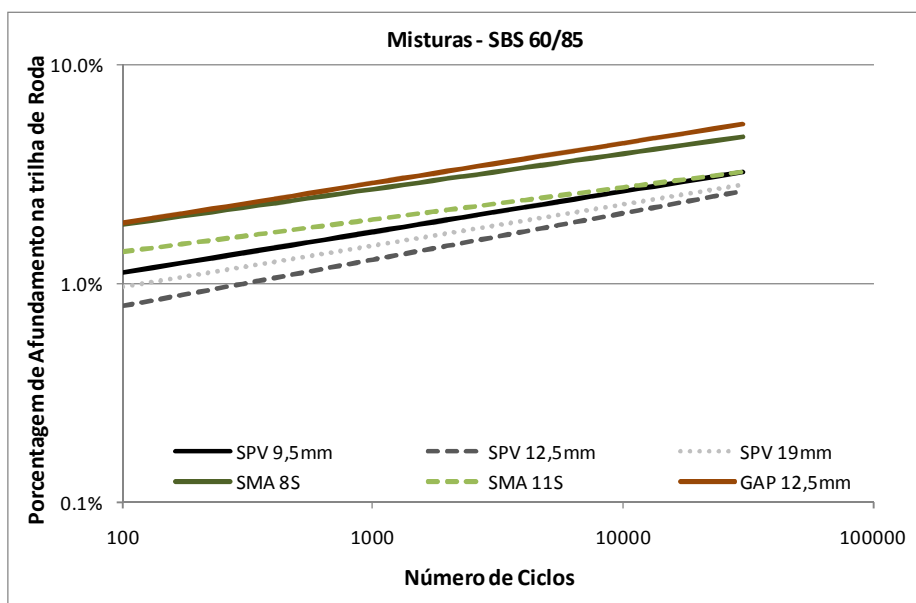


Figura 23. Resultados de deformação permanente das misturas preparadas com o ligante modificado por polímero SBS 60/85

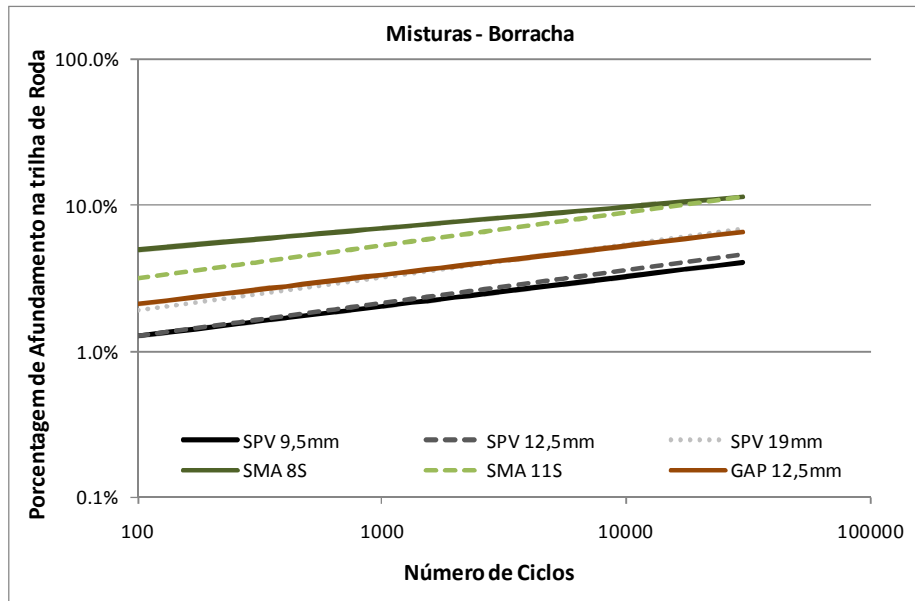


Figura 24. Resultados de deformação permanente das misturas preparadas com o ligante modificado por borracha

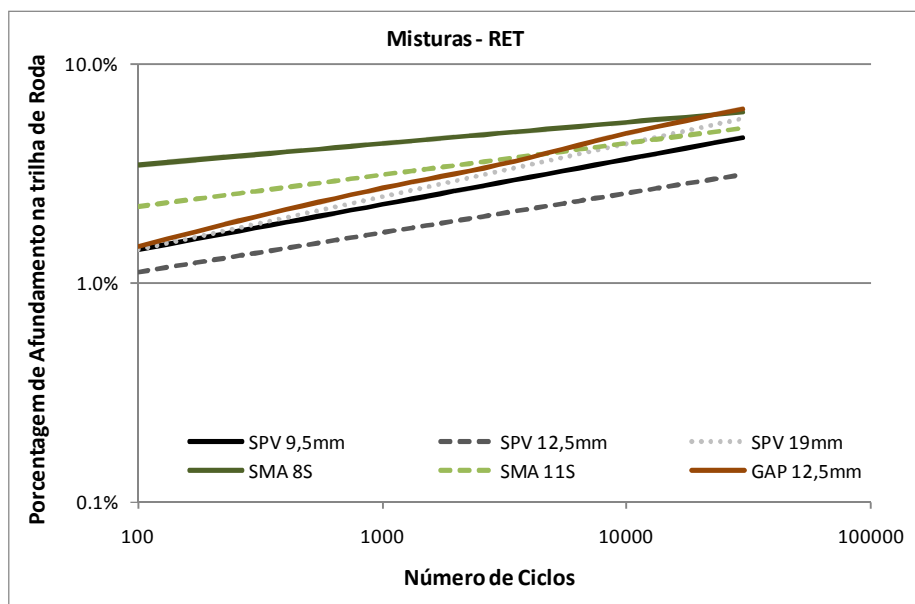


Figura 25. Resultados de deformação permanente das misturas preparadas com o ligante modificado por RET

Observa-se das figuras acima que além do valor final de deformação permanente (após 30.000 ciclos), também é importante analisar a inclinação da reta. Retas com inclinação mais acentuada podem indicar misturas asfálticas que sofrem o processo de deformação permanente ao longo de sua vida em serviço, sendo mais difíceis de controlar durante o processo executivo da camada.

Dessa forma, optou-se por também determinar as inclinações das retas, conforme ilustrado nas Figuras 26 a 29 para os quatro ligantes asfálticos.

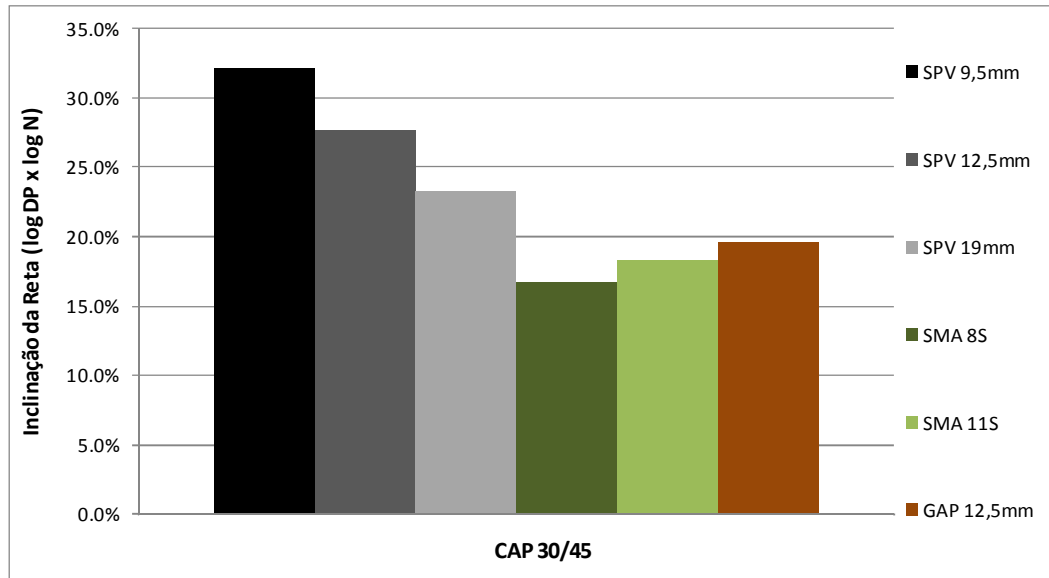


Figura 26. Inclinação da reta das misturas preparadas com o CAP 30/45

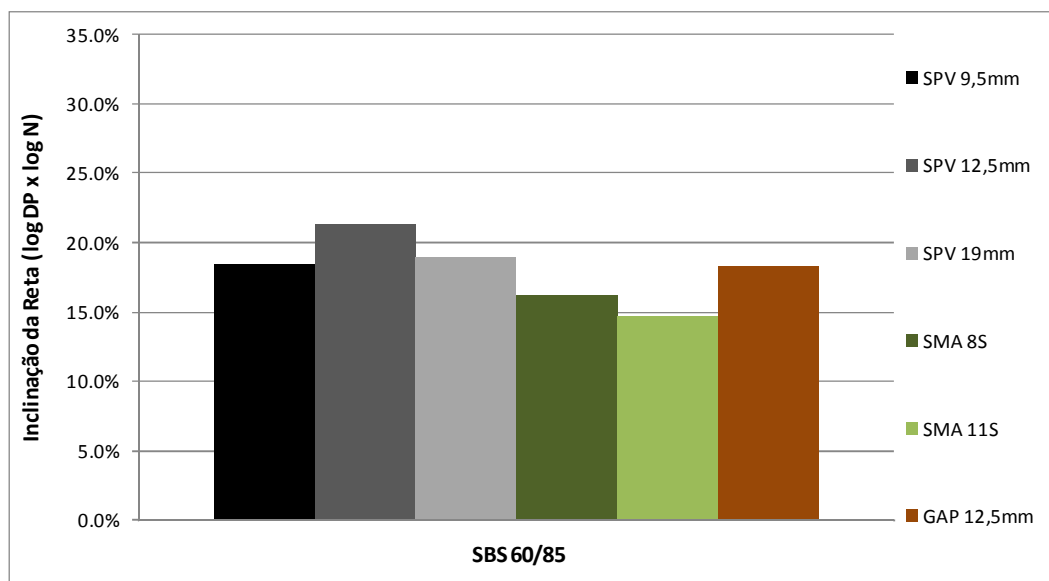


Figura 27. Inclinação da reta das misturas preparadas com o ligante modificado por polímero SBS 60/85

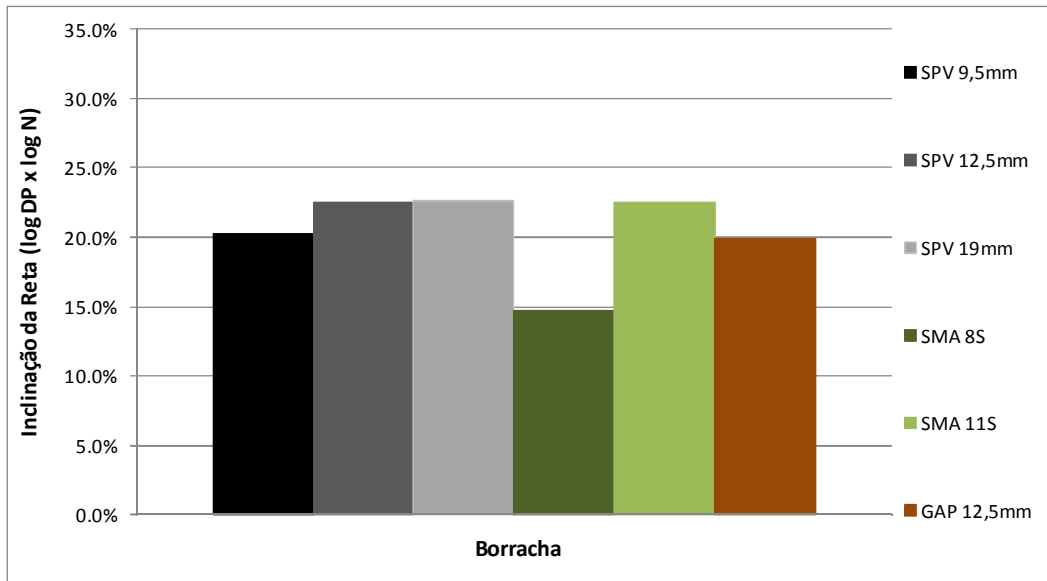


Figura 28. Inclinação da reta das misturas preparadas com o ligante modificado por borracha

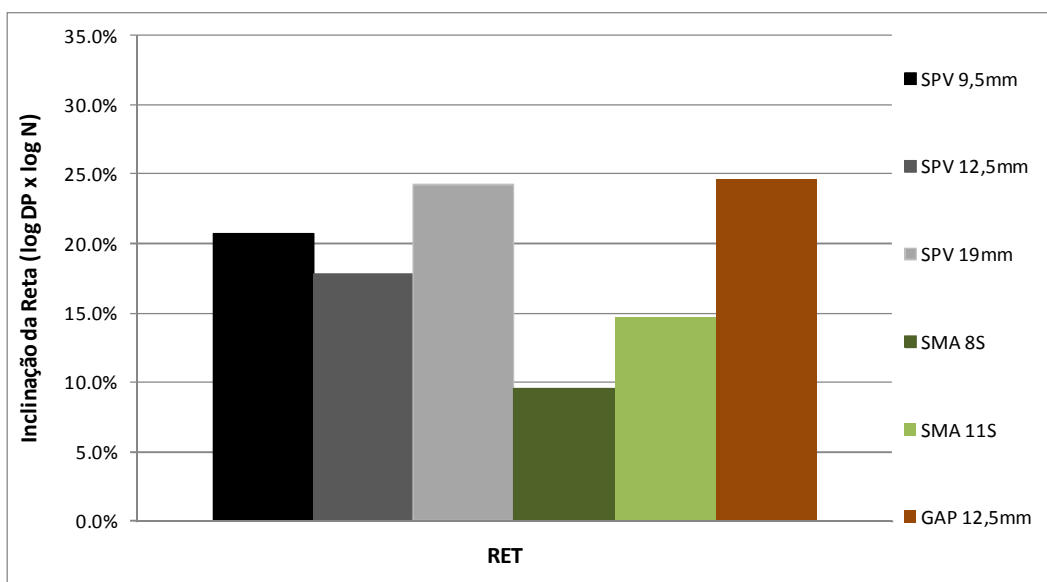


Figura 29. Inclinação da reta das misturas preparadas com o ligante modificado por RET

5.2.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral – Análise da Energia Dissipada no Processo

Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral (sendo verificada a energia dissipada no decorrer do ensaio). Estes ensaios foram realizados seguindo a norma ABNT (2004) NBR 15087 – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nas temperaturas de 25°C e 5°C, com corpos-de-prova compactados no padrão Marshal empregando-se 75 golpes por face para as misturas

SPV e GAP e 50 golpes por face para as misturas SMA e CPA. Um material pode se comportar de maneira dúctil ou frágil dependendo da temperatura, taxa de carregamento e outras variáveis. Dessa forma, quando se trata de materiais dúcteis ou frágeis faz-se na verdade referência ao estado de tensão do material. Os seguintes parâmetros foram quantificados: (i) resistência à tração por compressão diametral (RT); (ii) energia total dissipada (E_{total}); e (iii) energia dissipada até o ponto de carga máxima ($E_{P_{\text{máx}}}$). As energias foram determinadas através da área sob a curva de carga versus deslocamento. A Figura 30 apresenta dois exemplos de resultados, cabendo salientar a importância da obtenção da curva após o pico de carga máxima, visto que para algumas misturas a área pós-pico pode ser mais representativa, conforme será abordado no item 6.4 deste relatório. A Tabela 2 e as Figuras 31 e 32 apresentam os resultados obtidos.

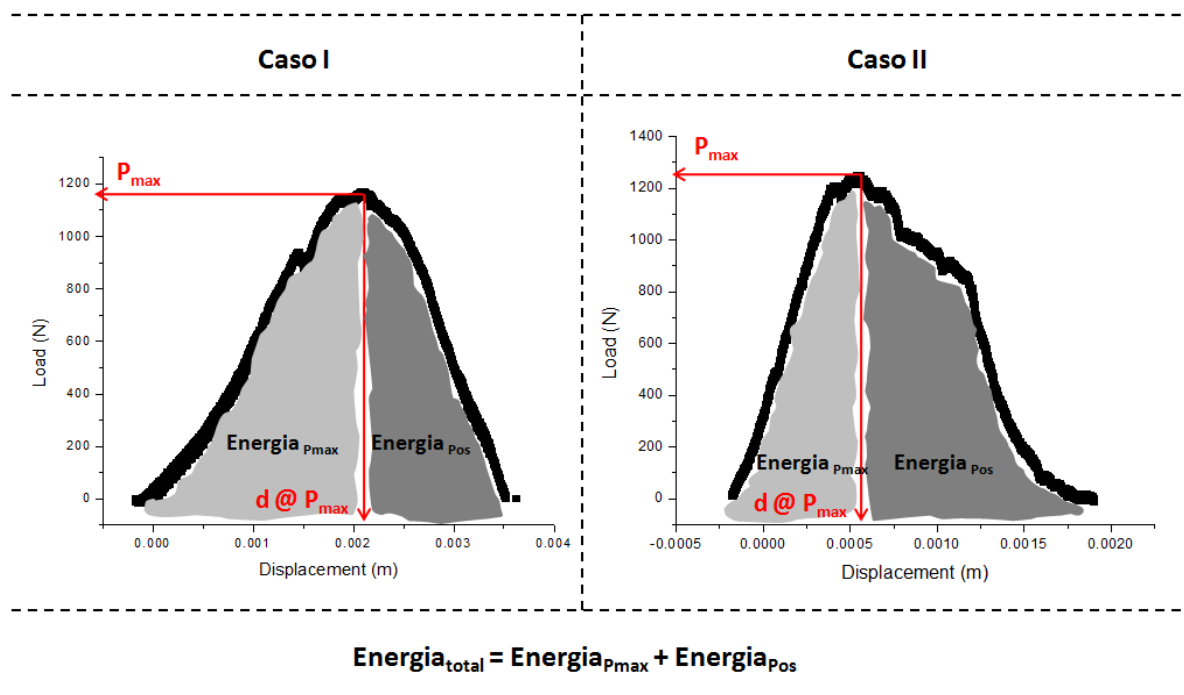


Figura 30. Ilustração do método de avaliação da energia dissipada durante a ruptura do corpo-de-prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 2. Resultados de resistência à tração e de energia dissipada (E_{total} , e E_{Pmax})

Mistura	25°C			5°C		
	RT (Mpa)	E_{total} (N.m)	E_{Pmax} (N.m)	RT (Mpa)	E_{total} (N.m)	E_{Pmax} (N.m)
(A)	1.77	64.20	25.56	4.67	46.15	31.20
(B)	1.74	62.50	19.23	5.04	62.35	40.09
(C)	1.79	64.80	16.63	4.62	42.64	30.08
(D)	1.22	73.22	18.42	4.02	71.02	34.50
(E)	1.23	72.09	16.63	3.62	91.58	34.50
(F)	1.20	68.62	20.99	3.46	66.78	27.31
(G)	0.92	51.10	14.42	2.61	51.14	21.59
(H)	0.96	52.07	12.73	2.62	58.72	24.00
(I)	1.89	79.42	27.36	5.79	62.03	43.73
(J)	1.85	80.53	23.60	5.33	88.88	41.20
(K)	1.81	80.49	23.76	5.46	65.47	40.31
(L)	1.14	105.46	24.31	4.59	102.15	44.84
(M)	1.25	95.38	20.12	4.30	117.23	42.31
(N)	1.19	85.47	19.82	3.94	93.88	38.98
(O)	0.76	66.72	16.28	2.53	83.22	36.16
(P)	0.89	61.48	16.36	2.79	68.94	26.04
(Q)	1.47	53.68	16.36	4.44	93.95	50.08
(R)	1.37	59.14	16.04	4.23	114.25	54.40
(S)	1.16	65.69	14.15	4.08	120.17	47.70
(T)	1.01	84.61	15.07	3.56	136.55	52.05
(U)	0.97	79.17	15.74	3.82	141.79	54.19
(V)	1.14	62.18	15.01	3.66	112.16	42.46
(W)	0.65	38.46	8.95	2.18	81.64	28.87
(X)	0.64	37.54	8.08	2.05	75.94	25.81
(Y)	1.69	75.88	22.80	5.07	48.26	31.84
(Z)	1.58	72.82	20.67	4.94	65.96	36.35
(AA)	1.59	66.11	18.11	5.13	58.71	35.59
(BB)	1.36	81.75	19.71	4.60	58.64	33.64
(CC)	1.49	82.82	19.18	4.66	59.64	32.27
(DD)	1.27	71.67	16.78	4.14	52.08	25.80
(EE)	1.17	42.77	12.00	2.87	40.63	20.28
(FF)	1.17	44.73	11.56	2.78	35.46	17.33

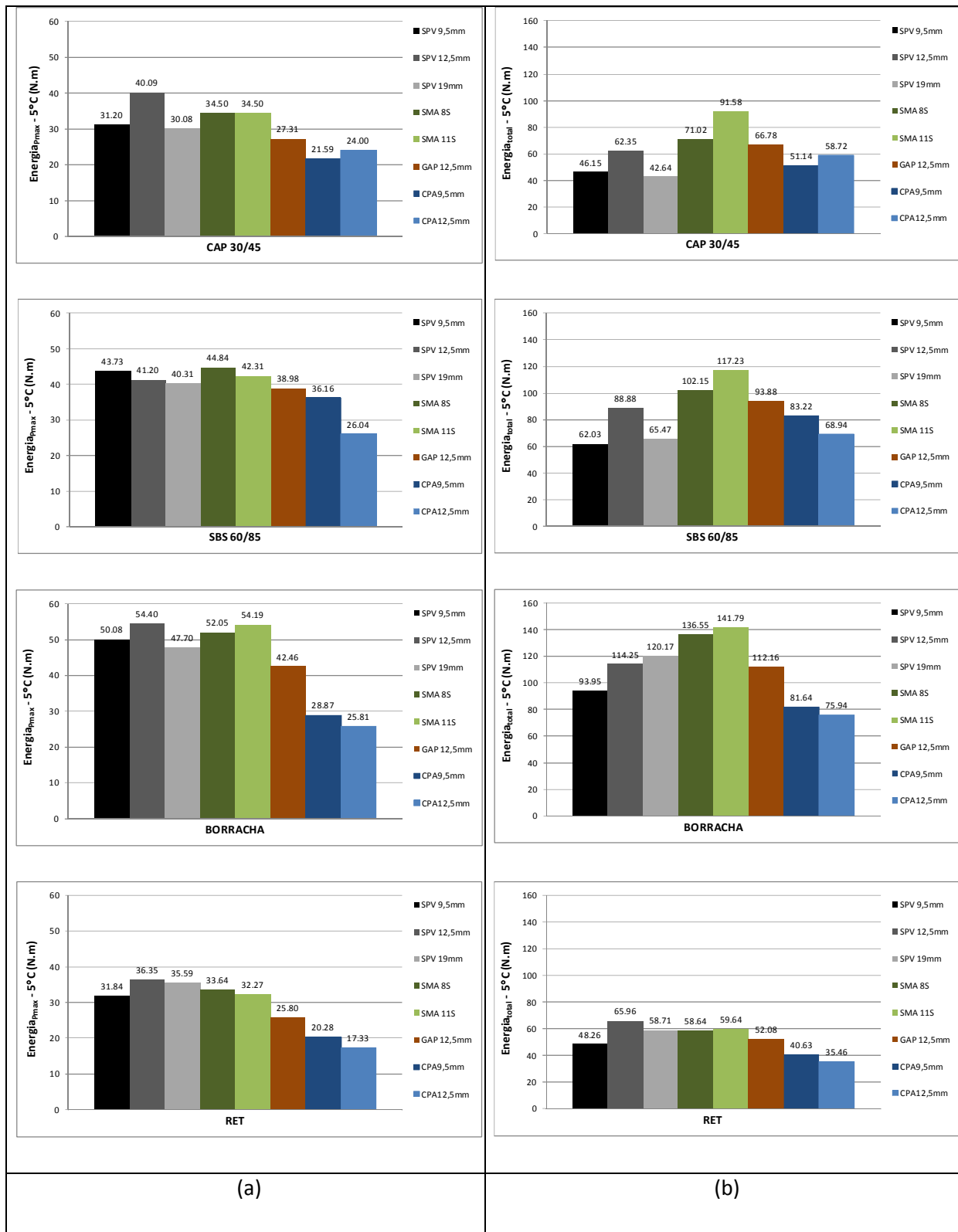


Figura 31. Resultados das energias dissipadas no ensaio de RT a 5°C: (a) energia até a carga máxima e (b) energia total

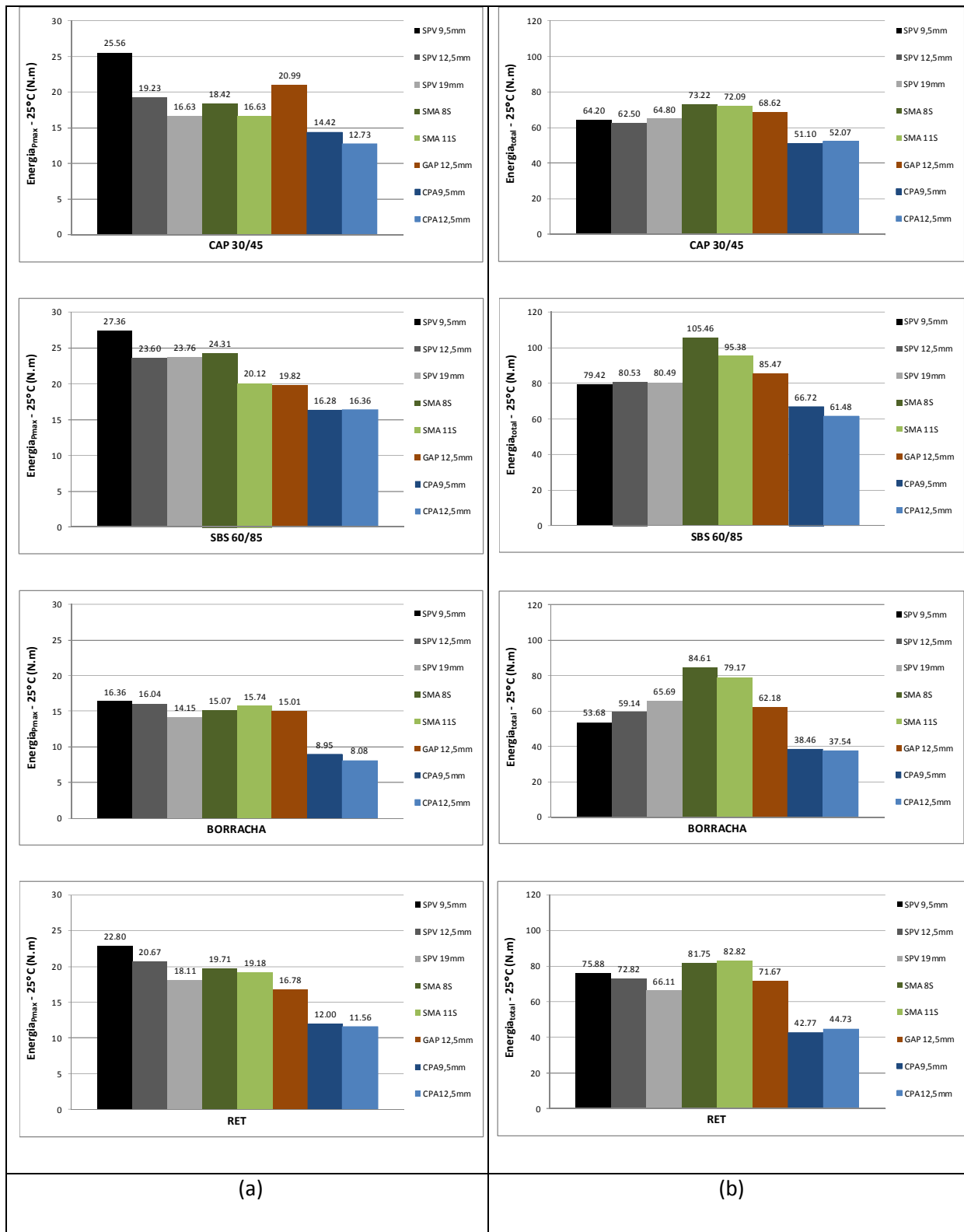


Figura 32. Resultados das energias dissipadas no ensaio de RT a 25°C: (a) energia até a carga máxima e (b) energia total

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Abaixo seguem algumas conclusões obtidas nas diversas etapas do projeto, bem como as considerações finais.

6.1 Dosagem das misturas asfálticas

- As misturas preparadas com o ligante asfalto borracha apresentaram os maiores teores de projeto (para as distintas granulometrias estudadas). Os menores teores foram obtidos para as misturas com o CAP 30/45, com excessão das misturas de CPA que apresentaram menores teores para o ligante modificado por RET (Figura 33).
- A energia dissipada durante o ensaio de estabilidade Marshall apresentou grande variabilidade, dificultando a análise de possíveis tendências de comportamento. Desta forma, a energia calculada a partir deste ensaio não é recomendada para previsão de comportamento de misturas asfálticas.

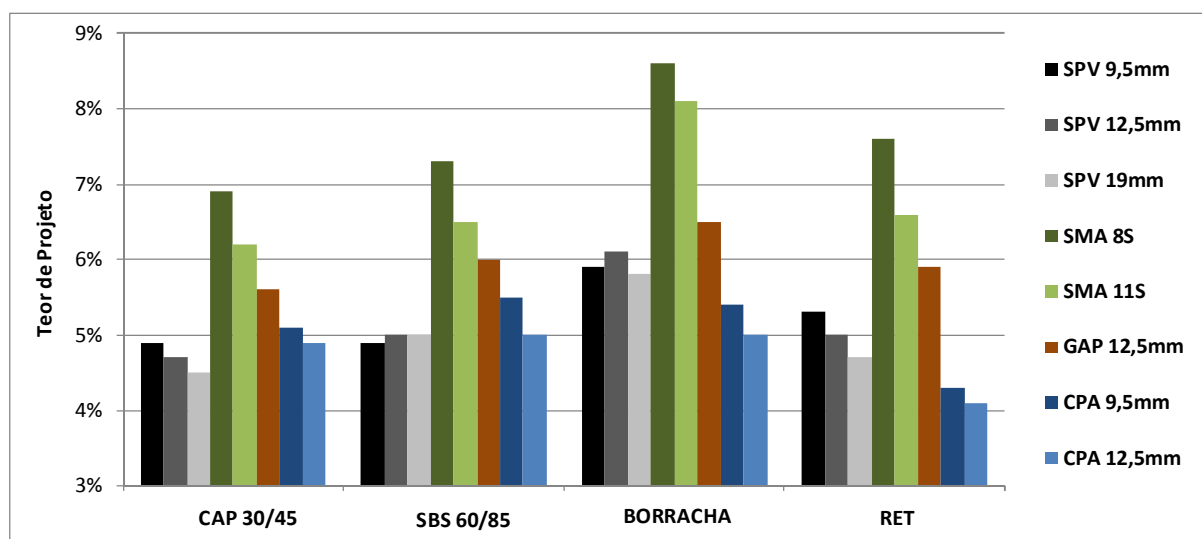


Figura 33. Ilustração dos teores de projeto por tipo de ligante para as diferentes granulometrias

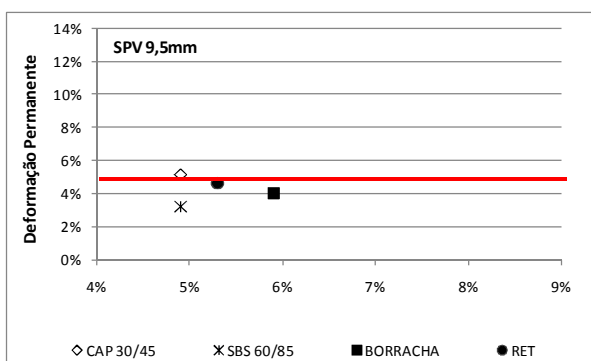
6.2 Módulo de resiliência

- As misturas preparadas atendendo as especificações de granulometria SPV (mistura densa e contínua) apresentaram maior rigidez, ao passo que as misturas do tipo CPA foram as menos rígidas. As misturas SMA e GAP tiveram rigidez intermediária para os quatro ligantes asfálticos.

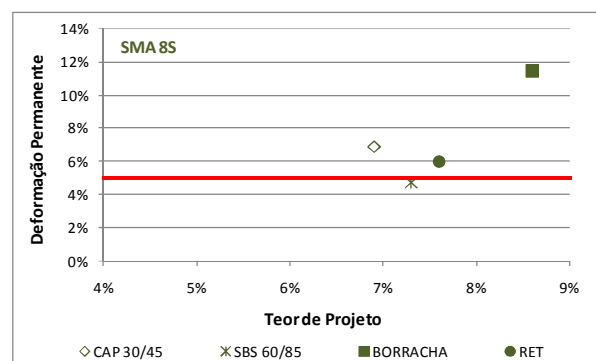
- As misturas preparadas com ligante modificado por borracha apresentaram os menores valores de módulo de resiliência (menos rígidas). Para as misturas de maior rigidez houve variação a depender da granulometria. As misturas SPV produzidas com o ligante modificado por SBS foram as mais rígidas, ao passo que para as misturas SMA, GAP e CPA, o ligante modificado por RET apresentou maior módulo.
- O tamanho máximo nominal (TMN) não teve influência significativa nos resultados de MR e não apresentou tendência de comportamento, tendo algumas misturas diminuído o MR com o aumento do TMN, enquanto outras aumentaram.

6.3 Deformação permanente

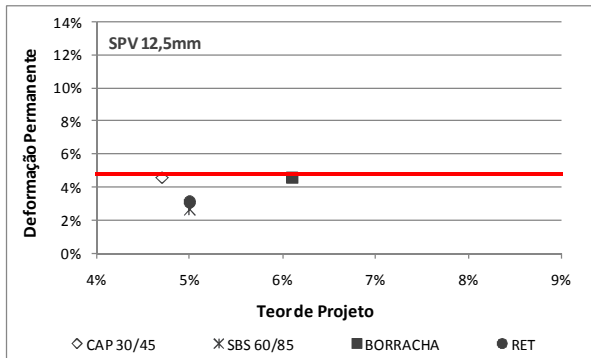
- As misturas preparadas com asfalto borracha apresentaram as maiores deformações permanentes após os 30.000 ciclos (exceto para a mistura SPV 9,5mm). A Figura 34 abaixo apresenta os gráficos de deformação permanente versus teor de projeto, onde é possível observar que as misturas com o ligante asfalto borracha também foram as de teor de projeto mais elevado, indicando uma possível necessidade de ajuste na dosagem das misturas asfálticas com esse tipo de ligante.
- Dentre as granulometrias avaliadas, as misturas SMA foram as que apresentaram os valores mais elevados de deformação permanente. Apenas as misturas com o ligante SBS 60/85 atenderam o limite de 5%, ilustrado na Figura 34. Esse tipo de mistura descontínua é muito sensível à variações na distribuição granulométrica, de forma que pequenas variações nas peneiras pode levar à perda do intertravamento entre os agregados, causando deformação permanente por densificação da massa asfáltica.



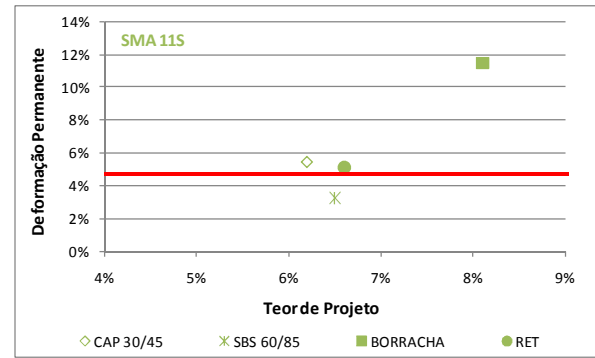
(a)



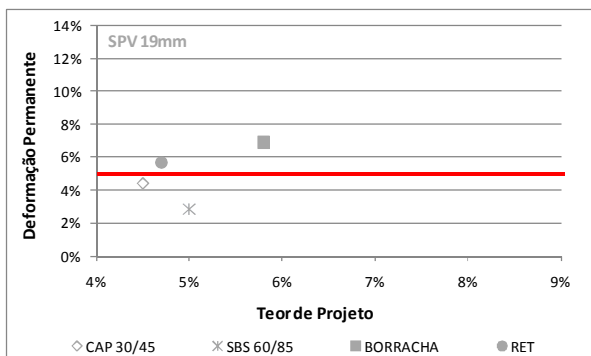
(d)



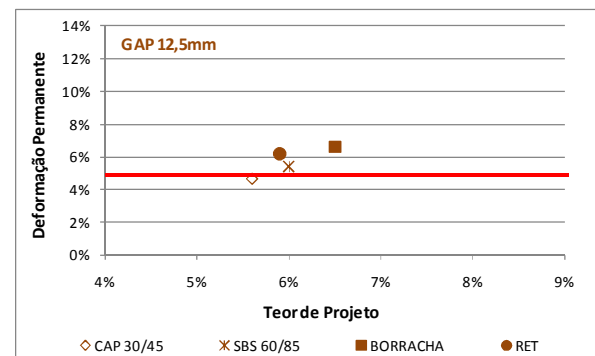
(b)



(e)



(c)



(f)

Figura 34. Gráficos de deformação permanente versus teor de projeto para as misturas: (a) SPV 9,5mm, (b) SPV 12,5mm, (c) SPV 19mm, (d) SMA 8S, (e) SMA 11S e (f) GAP 12,5mm

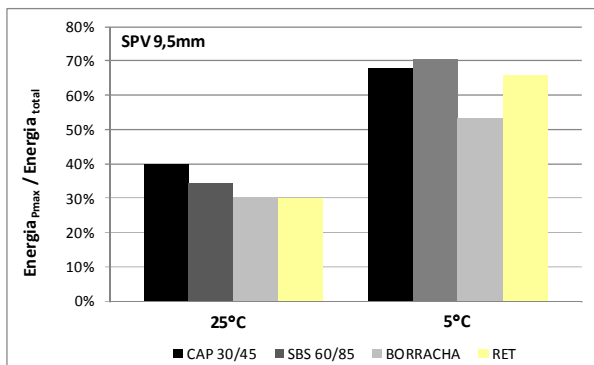
6.4 Resistência à tração por compressão diametral e energia dissipada

A Figura 35 apresenta os resultados de $\text{Energia}_{\text{pmax}}/\text{Energia}_{\text{total}}$ para as 32 misturas estudadas, nas duas temperaturas de ensaio. O intuito dos gráficos é verificar: (i) o efeito da temperatura e (ii) a representatividade da área após o pico de carga máxima. Diante dos resultados foi possível observar:

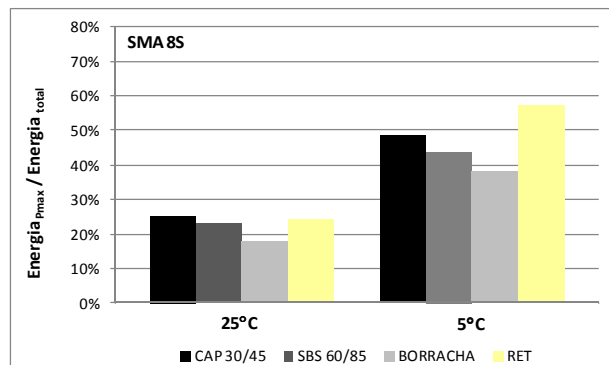
- À temperatura ambiente (25°C), a área após o pico de carga tem maior representatividade na área total, indicando uma maior influência do ligante asfáltico (por ser um material viscoelástico). A 5°C, as misturas já sem encontram mais próximos do regime elástico, indicando ruptura mais brusca do corpo-de-prova. Li e Marasteanu (2005) fizeram algumas considerações sobre o significado físico do que ocorre antes e após o pico de carga máxima em uma curva de carga versus deslocamento. Os autores mencionam que o módulo afeta a resposta da mistura de forma mais pronunciada antes do início da propagação da trinca, tendo menos efeito após o pico de carga. A energia coesiva seria o fator que mais afetaria a região após o pico, de forma que amostras com menor energia coesiva apresentariam

inclinação mais íngreme do pós-pico e um comportamento menos dúctil. O Anexo B apresenta todas as curvas de carga x deslocamento obtidos nesse projeto. Dos gráficos é possível observar essa inclinação mais íngreme para os CPs mais rígidos (5°C).

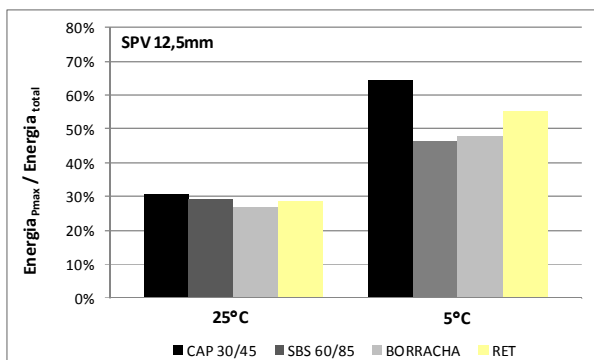
- As misturas preparadas com SBS 60/85 foram as que apresentaram menores valores de E_{pmax}/E_{total} . De acordo com Song *et al.* (2006), a região pré-pico de carga representa a parte elástica da lei coesiva, enquanto a região pós-pico de carga considera várias formas de dano que estão ocorrendo na zona de ruptura.



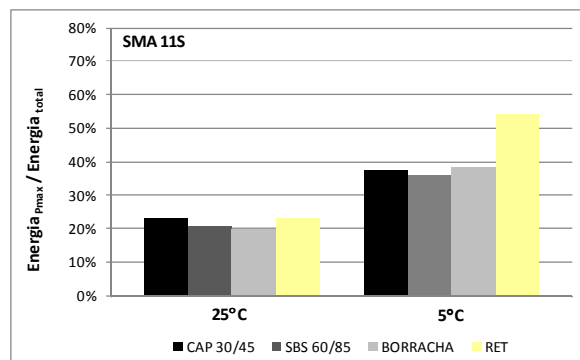
(a)



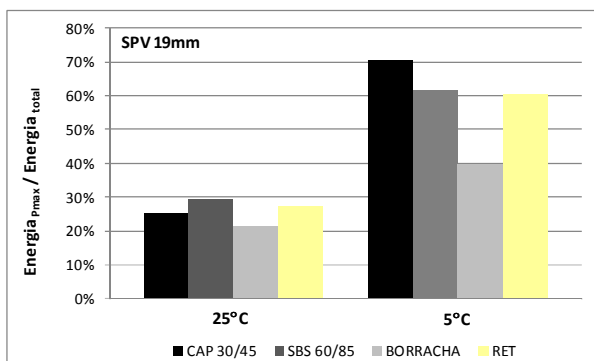
(e)



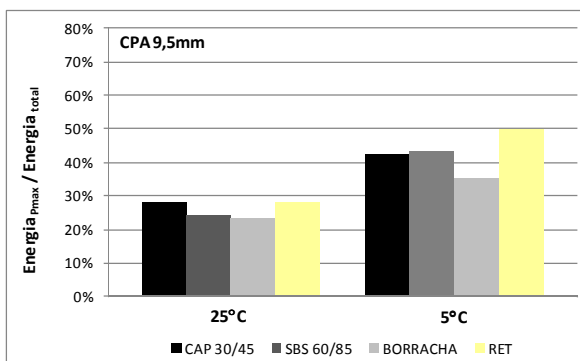
(b)



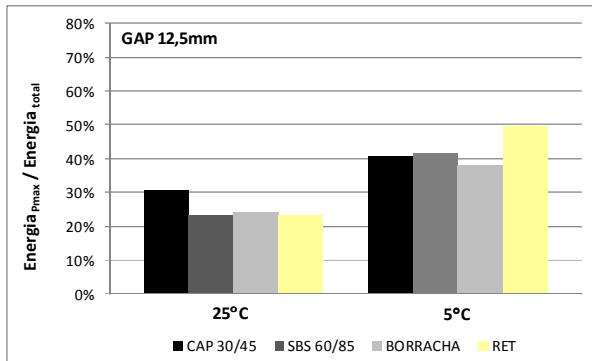
(f)



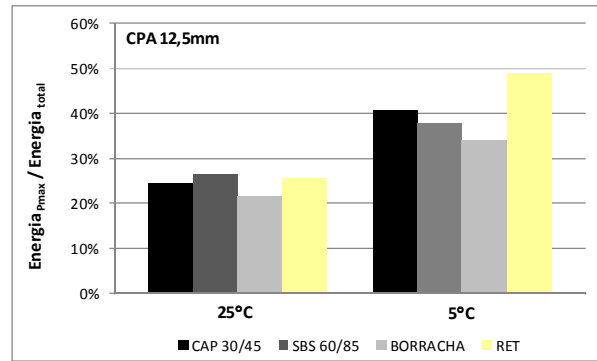
(c)



(g)



(d)



(h)

Figura 35. Efeito da temperatura na energia dissipada nas misturas asfálticas: (a) SPV 9,5mm, (b) SPV 12,5mm, (c) SPV 19mm, (d) GAP 12,5mm, (e) SMA 8S, (f) SMA 11S, (g) CPA 9,5mm, e (h) CPA 12,5mm

6.5 Considerações finais

- No geral, as misturas mais rígidas (maior módulo de resiliência) apresentaram menor afundamento na trilha de roda, mas não necessariamente o melhor comportamento com relação a energia dissipada no ensaio de resistência à tração.
- Com relação a energia dissipada medida no ensaio de RT, observou-se uma tendência de maiores valores, quando o percentual de ligante asfáltico era superior. Esse fenômeno é observado com mais clareza nos ensaios realizados a temperatura de 25°C, onde o comportamento do ligante é mais viscoso (e não frágil como nos ensaios à 5°C). Essa maior energia, porém, pode acarretar em valores excessivos de deformação permanente, conforme observado com mais clareza nas misturas do tipo SMA.
- Misturas que apresentam granulometria descontínua devem utilizar o ensaio de deformação permanente em trilha de roda como complemento da metodologia de dosagem, especialmente se as misturas forem empregadas em vias de tráfego lento e/ou pesado.
- É importante que para o cálculo da energia dissipada seja considerada a curva completa de carga x deslocamento, a fim de melhor caracterizar a mistura, principalmente quando da utilização de ligante asfáltico modificado.

Essa pesquisa constará de uma Fase 2, onde será possível avaliar possíveis correlações da energia dissipada no ensaio de RT com resultados de vida de fadiga, bem como com propriedades de mecânica da fratura.

7 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

IDENTIFICAÇÃO DAS EMPRESAS PARTICIPANTES

A empresa que coordena os serviços é a PAULISTA INFRA-ESTRUTURA LTDA associada com o:

- Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica da USP, e
- JMCHAVES Consultoria Ltda.

IDENTIFICAÇÃO DOS PARTICIPANTES

- Coordenador Geral: José Mário Chaves - JMChaves
- Assessoramento Técnico:
 - o Liedi Légi Bariani Bernucci –LTP-EPUSP
 - o Edson Moura – LTP-EPUSP
- Coordenador Técnico: Kamilla L. Vasconcelos, Pesquisadora
- Equipe Técnica LTP-EPUSP: Rosely Rufo, Pesquisadora e Kendi Sanbosuge, Tecnólogo
- Auxílio de laboratório LTP-EPUSP: Erasmo Alves, Técnico de Laboratório
- Auxílio de escritório LTP-EPUSP: Diomária Rocha Santos, Secretária
- Coordenador Laboratório da Paulista Infraestrutura: Vagner Alba – CDT

8 REFERÊNCIAS

- Li, X., e Marasteanu, M. O. (2005). "Cohesive Modeling of Fracture in Asphalt Mixtures at Low Temperature." *International Journal of Fracture*, 136, 285-308.
- Song, S. H., Paulino, G. H., e Buttlar, W. G. (2006). "A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material." *Engineering Fracture Mechanics*, 73(18), 2829-2848.

9 ANEXOS

9.1 Anexo A – G'raficos de Deformação Permanente

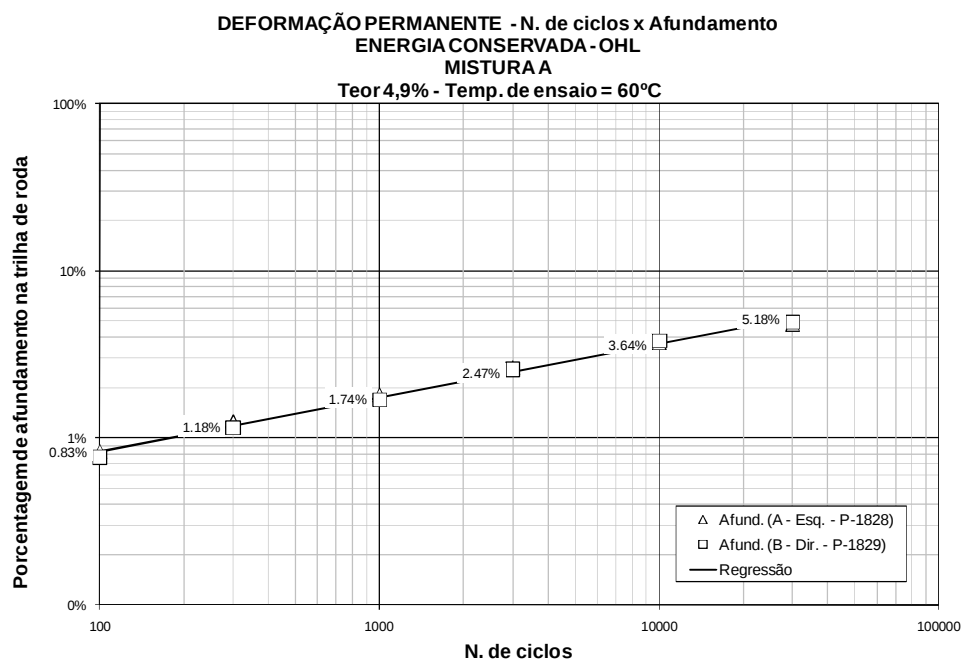
9.2 Anexo B – G'raficos de Carga x Deslocamento (Ensaio de resistência à tração por compressão diametral)



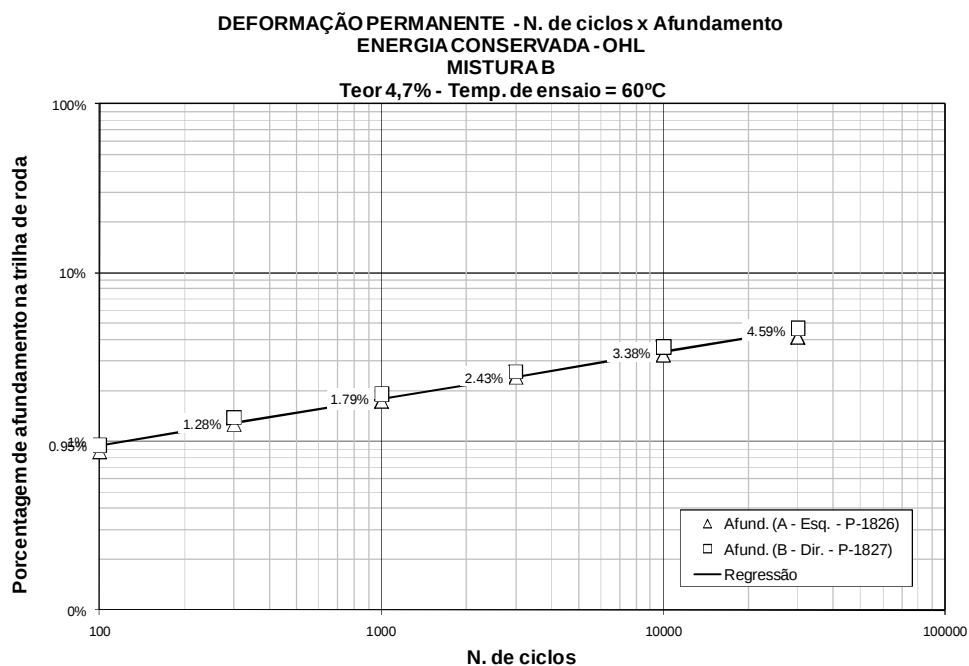
ANEXO A – GRÁFICOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE



MISTURA A – SPV 9,5mm e CAP 30/45

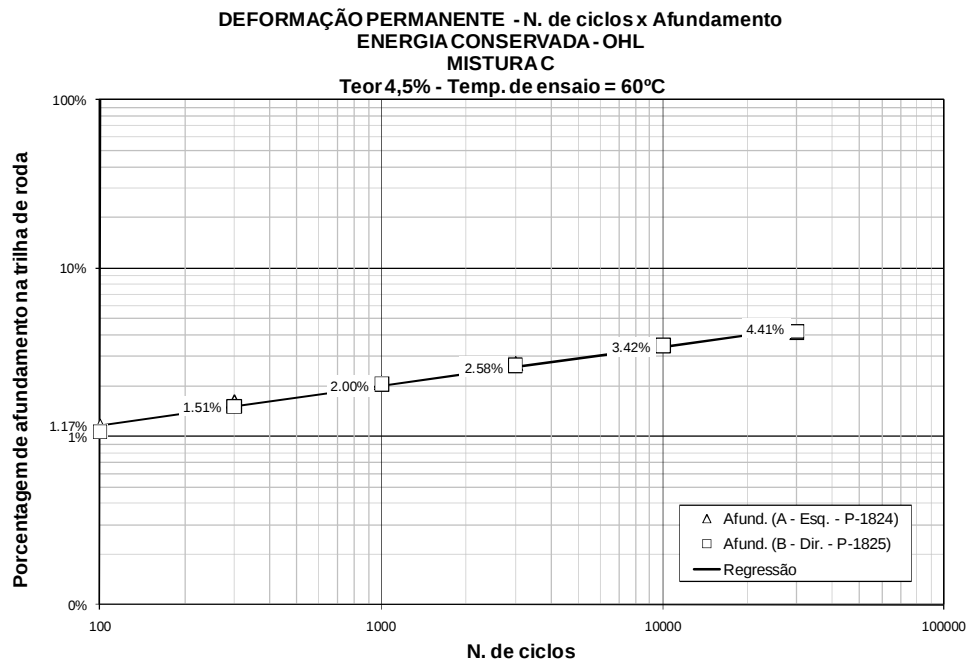


MISTURA B – SPV 12,5mm e CAP 30/45

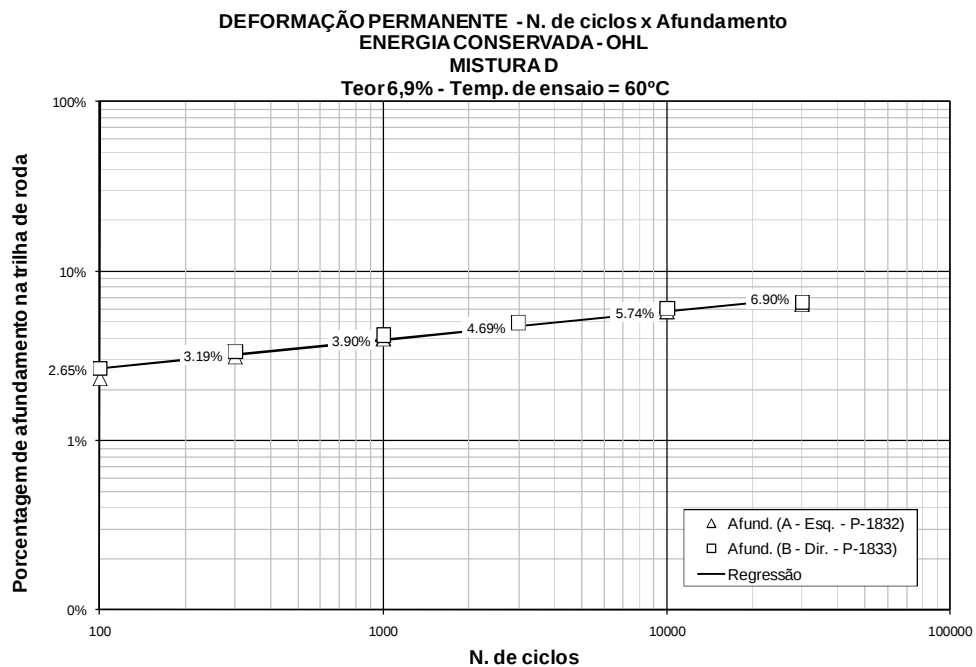




MISTURA C – SPV 19mm e CAP 30/45

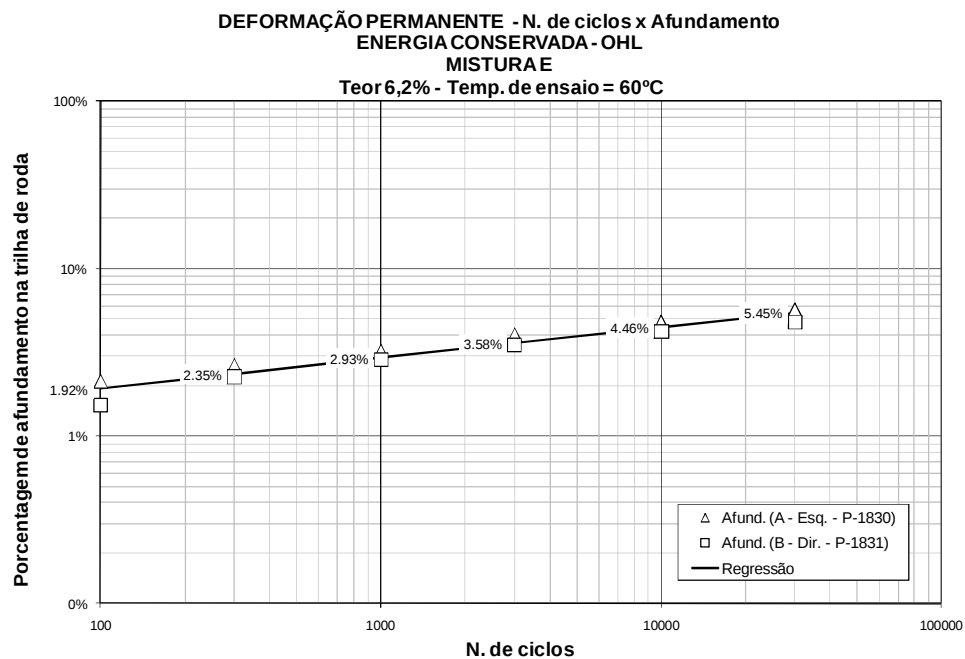


MISTURA D – SMA 8S e CAP 30/45

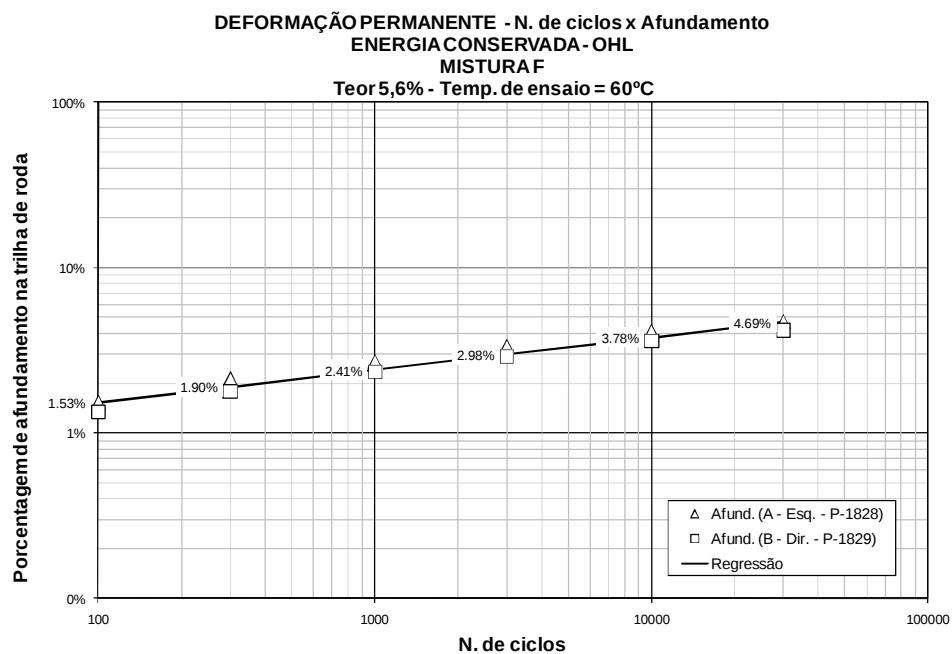




MISTURA E – SMA 11S e CAP 30/45

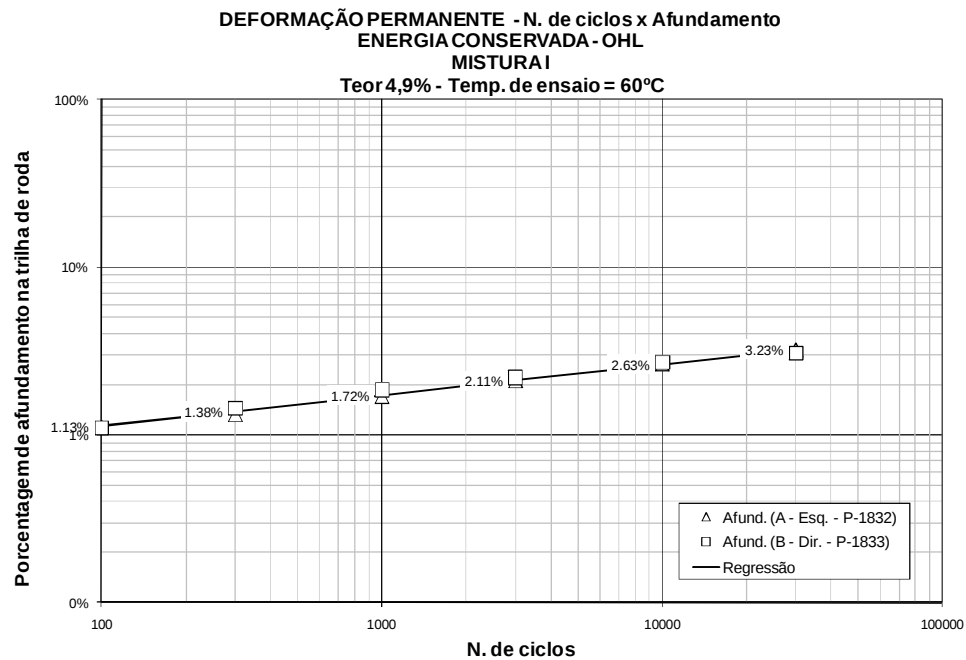


MISTURA F – GAP 12,5mm e CAP 30/45

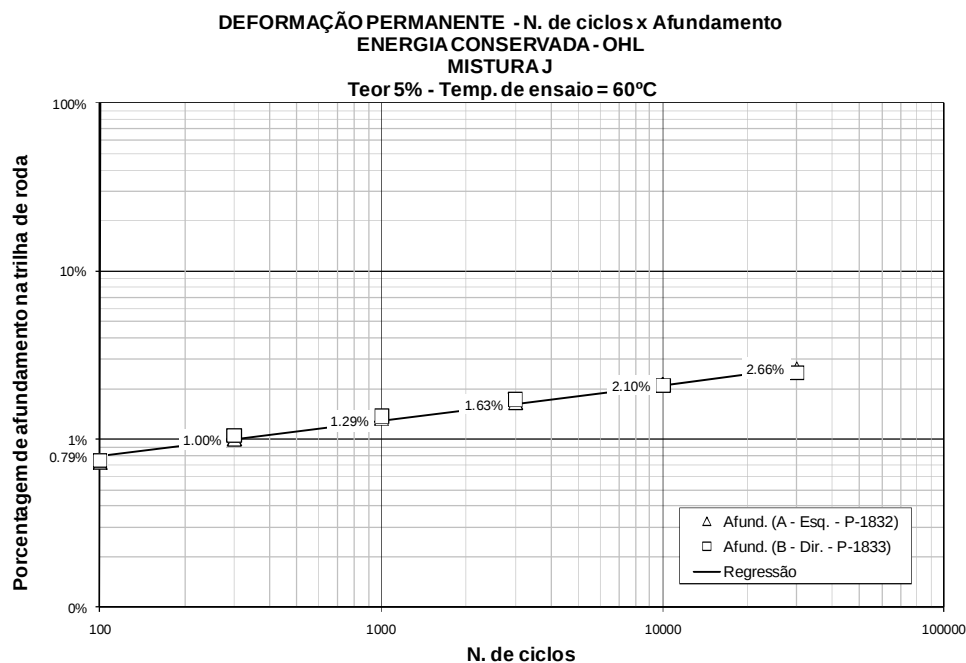




MISTURA I – SPV 9,5mm e SBS 60/85

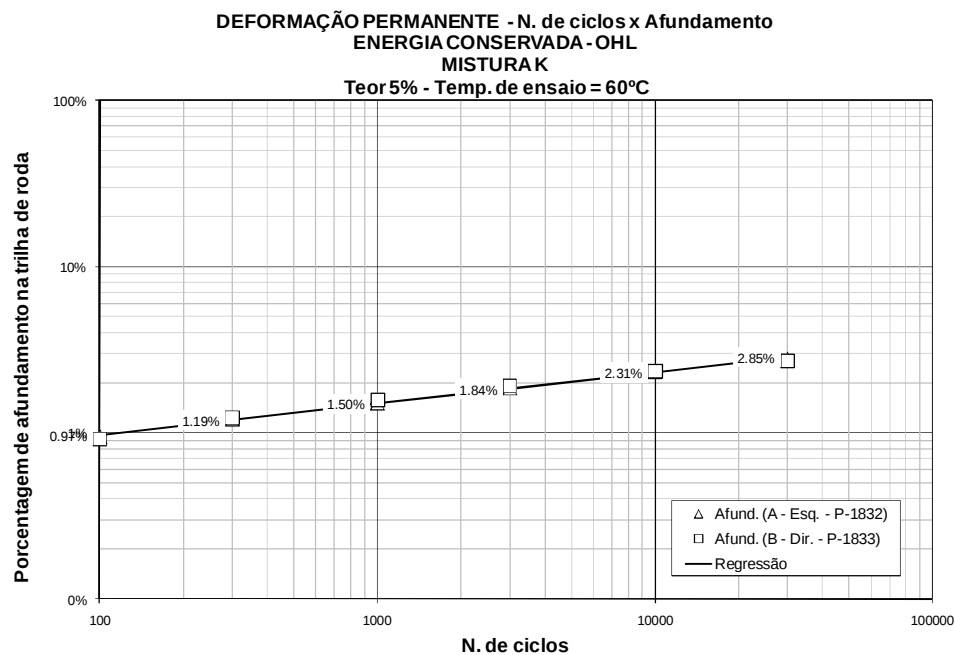


MISTURA J – SPV 12,5mm e SBS 60/85

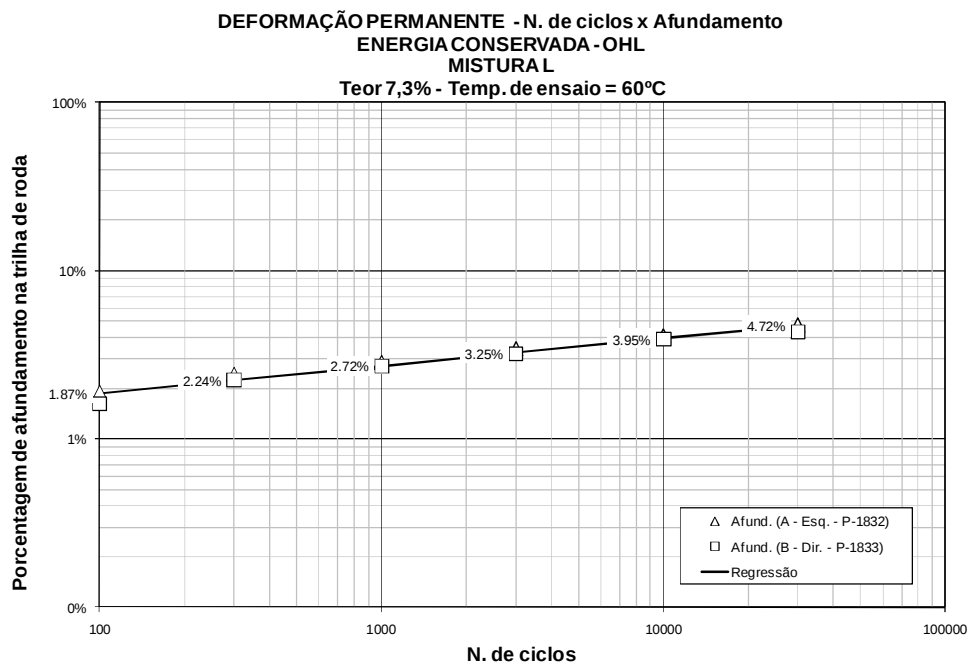




MISTURA K – SPV 19mm e SBS 60/85

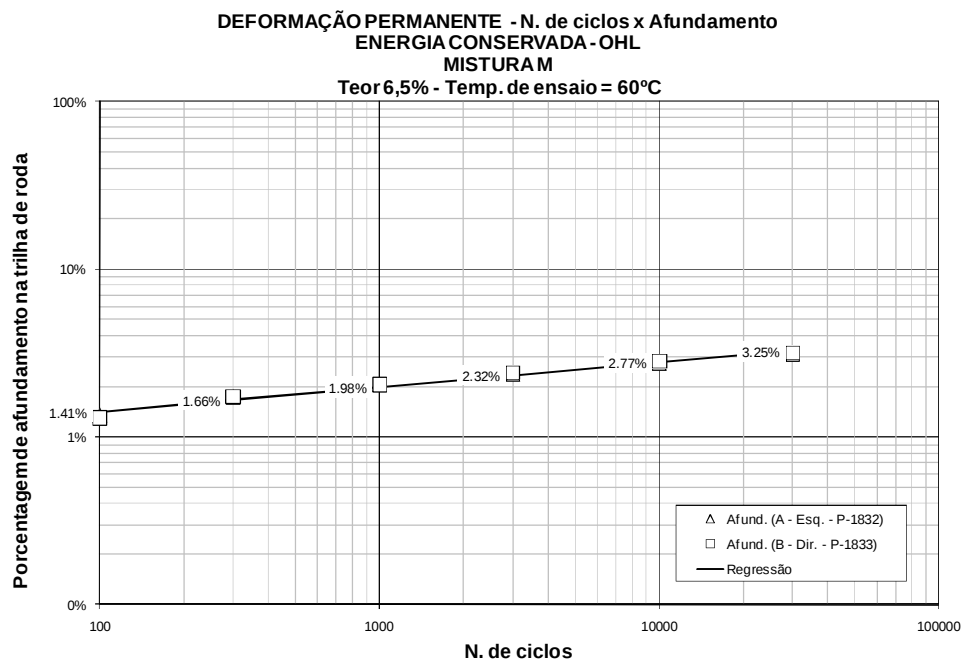


MISTURA L – SMA 8S e SBS 60/85

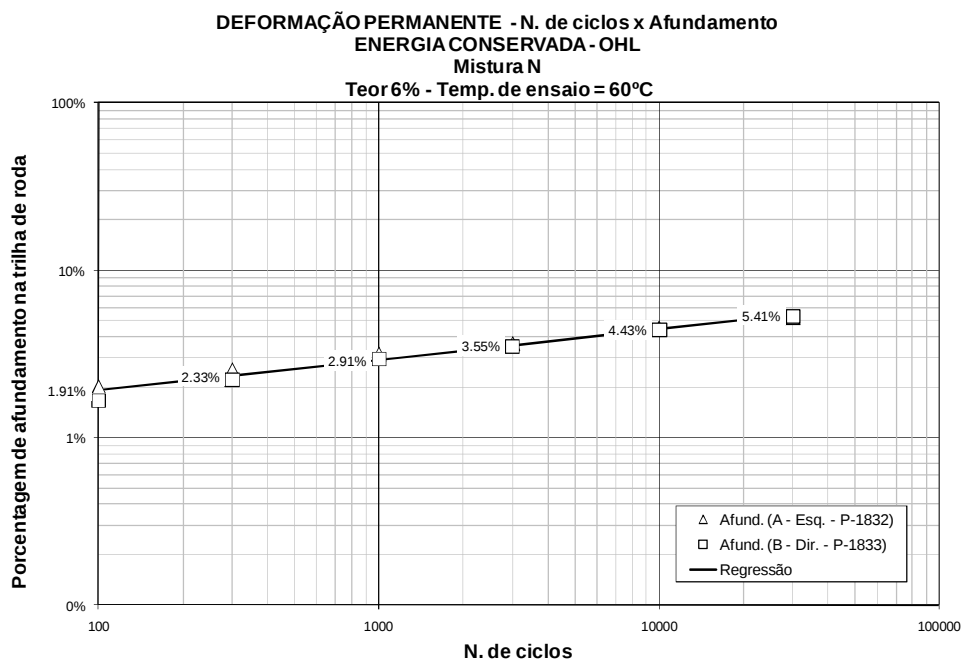




MISTURA M – SMS 11S e SBS 60/85

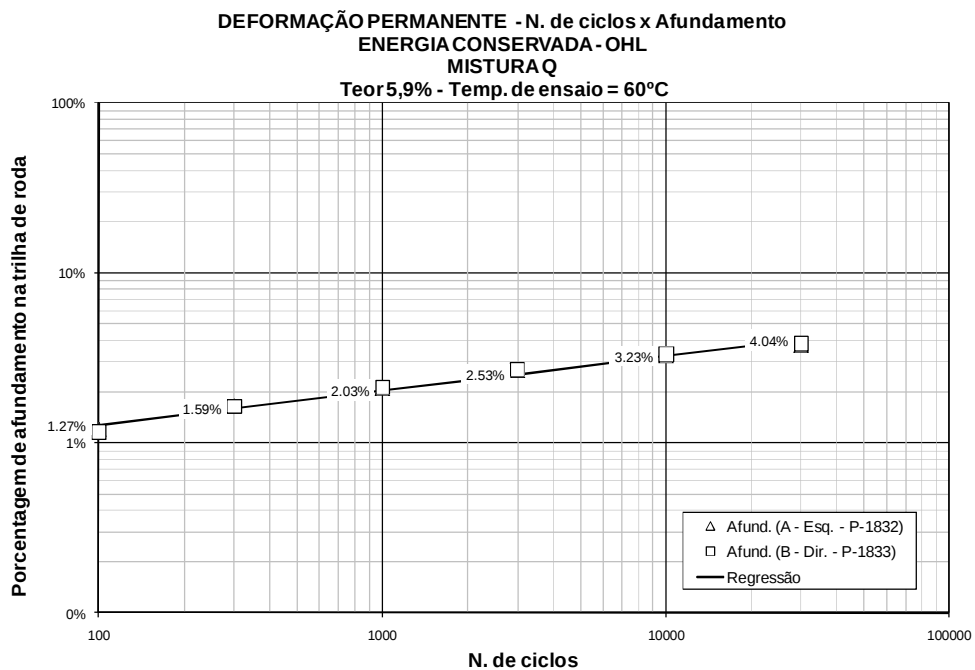


MISTURA N – GAP 12,5mm e SBS 60/85

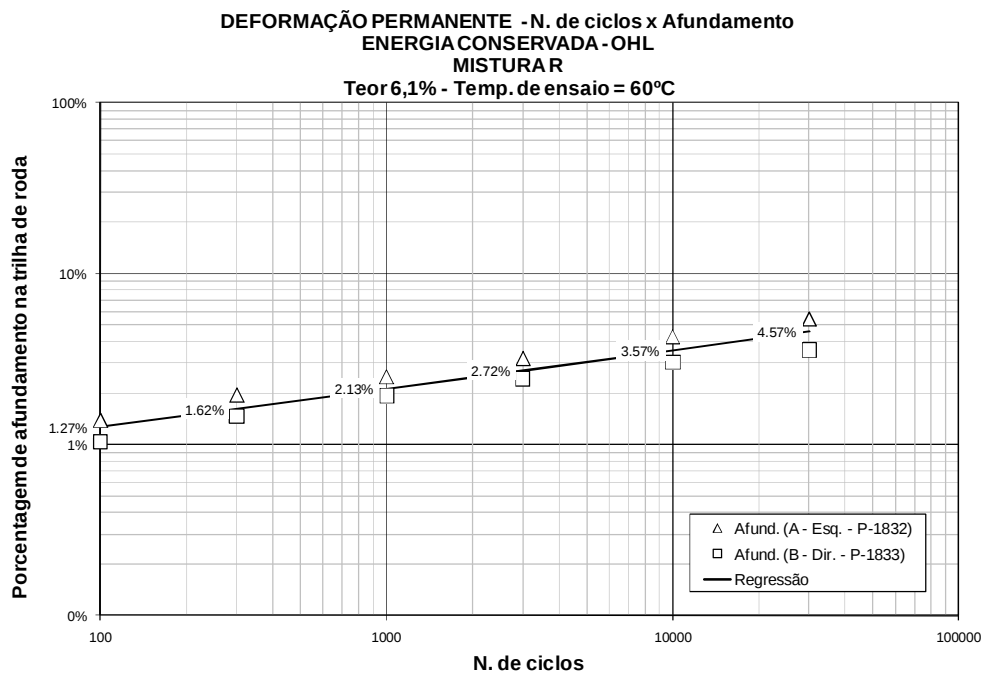




MISTURA Q – SPV 9,5mm e BORRACHA



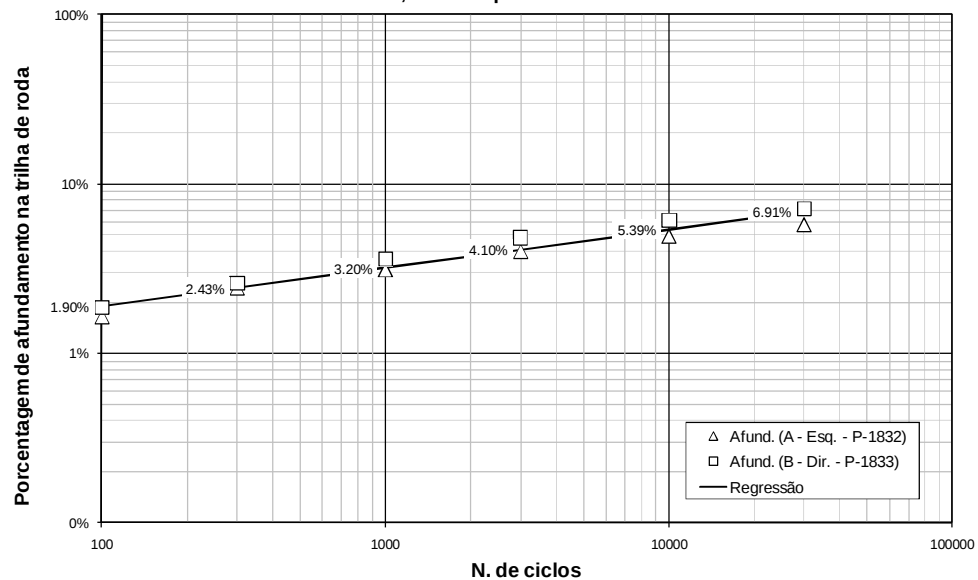
MISTURA R – SPV 12,5mm e BORRACHA





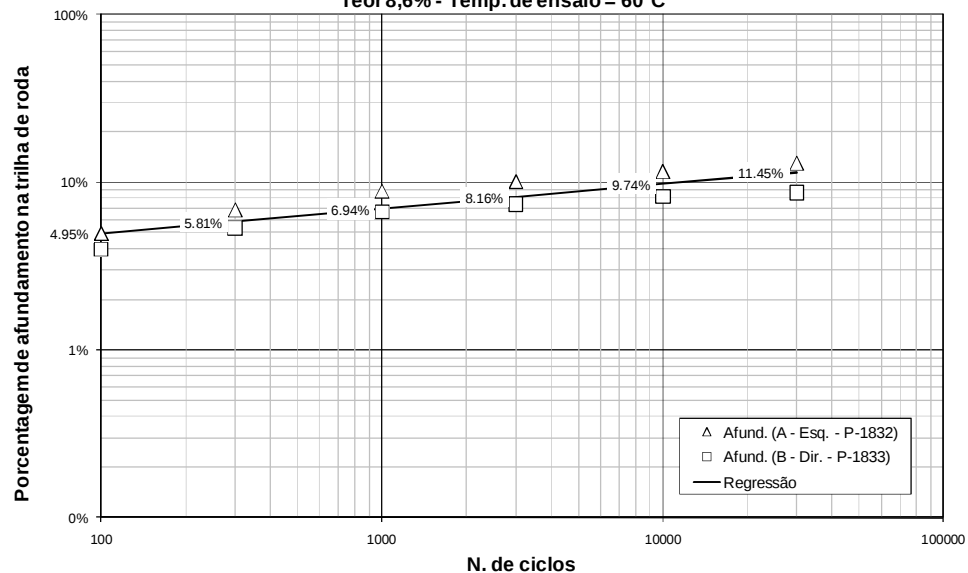
MISTURA S – SPV 19mm e BORRACHA

DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento
ENERGIA CONSERVADA - OHL
MISTURA S
Teor 5,8% - Temp. de ensaio = 60°C



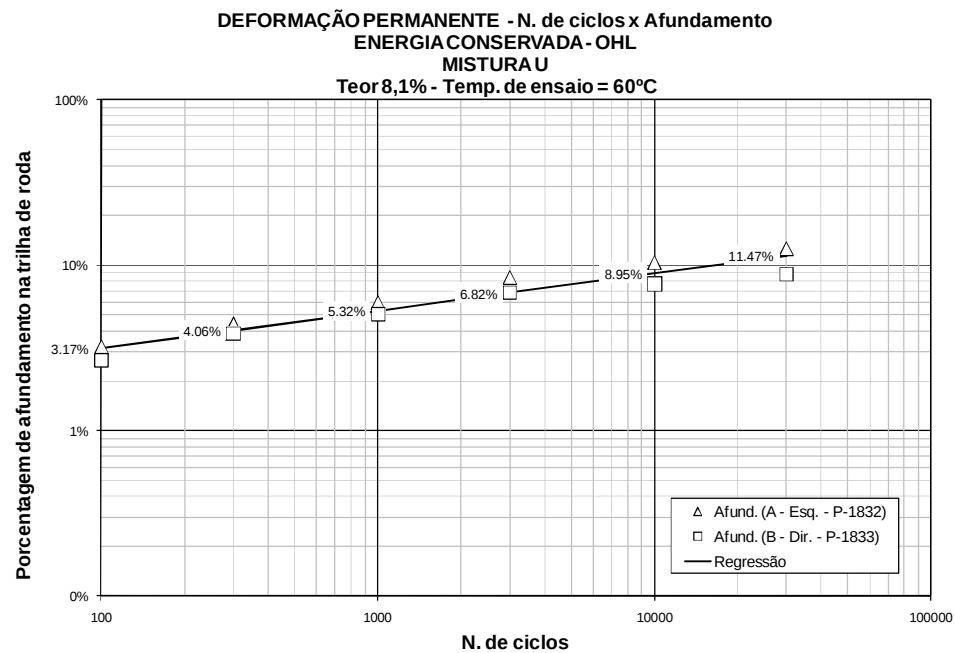
MISTURA T – SMA 8S e BORRACHA

DEFORMAÇÃO PERMANENTE - N. de ciclos x Afundamento
ENERGIA CONSERVADA - OHL
MISTURA T
Teor 8,6% - Temp. de ensaio = 60°C

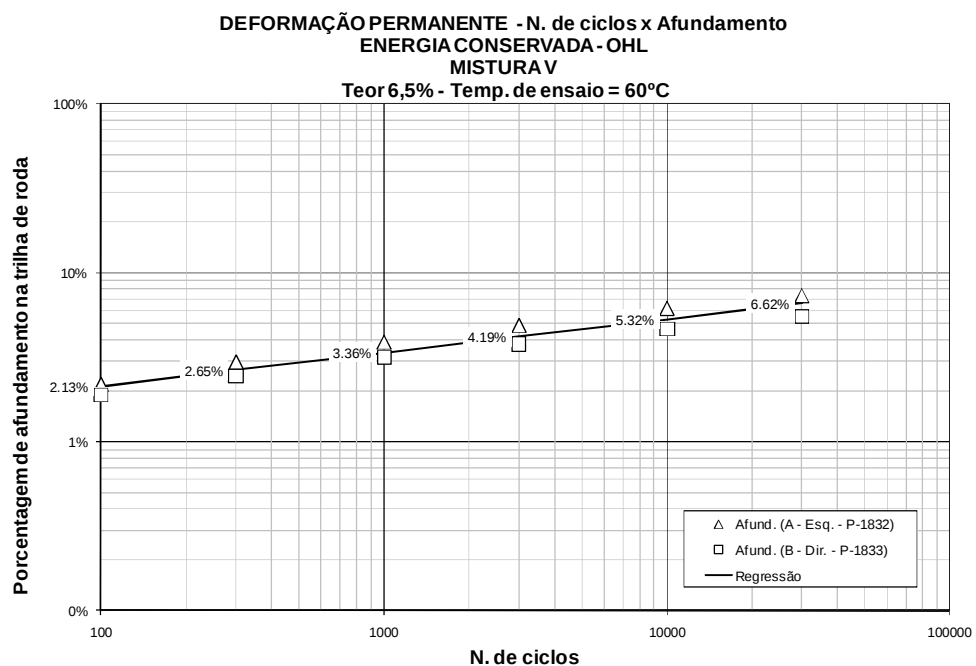




MISTURA U – SMA 11S e BORRACHA

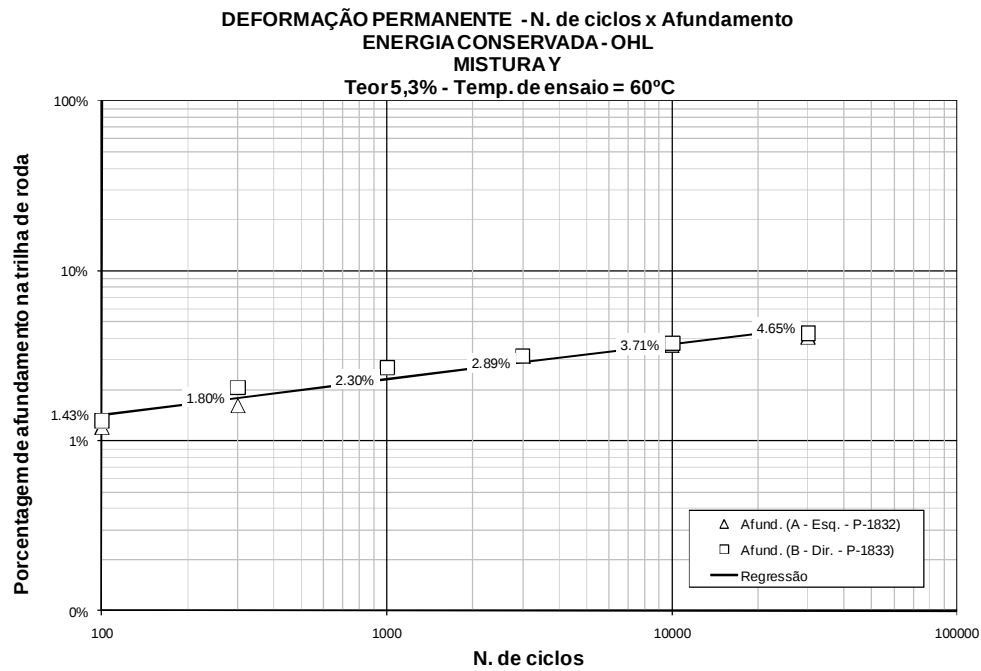


MISTURA V – GAP 12,5mm e BORRACHA

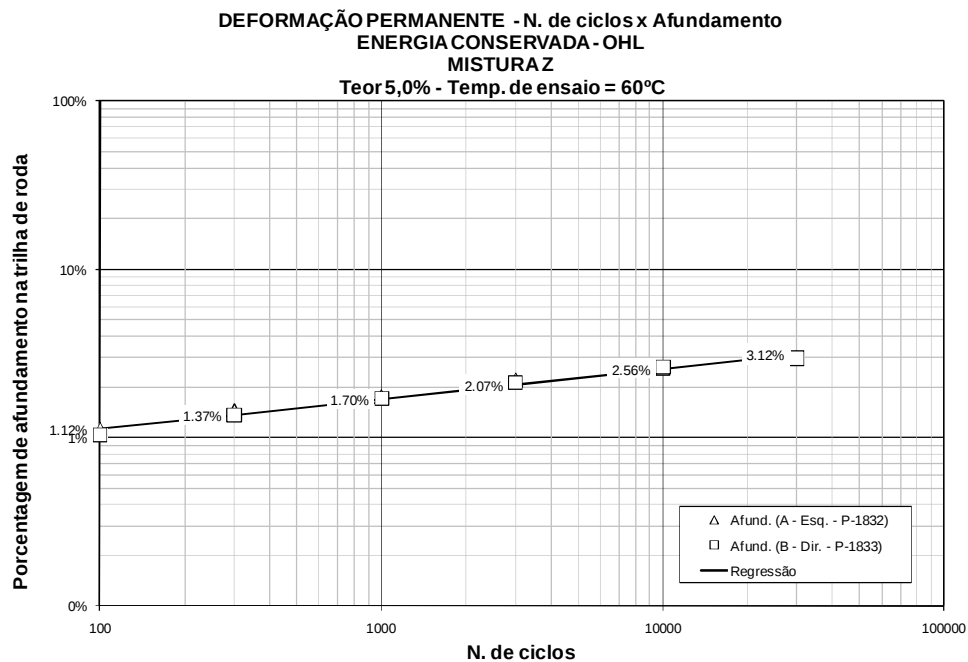




MISTURA Y – SPV 9,5mm e RET

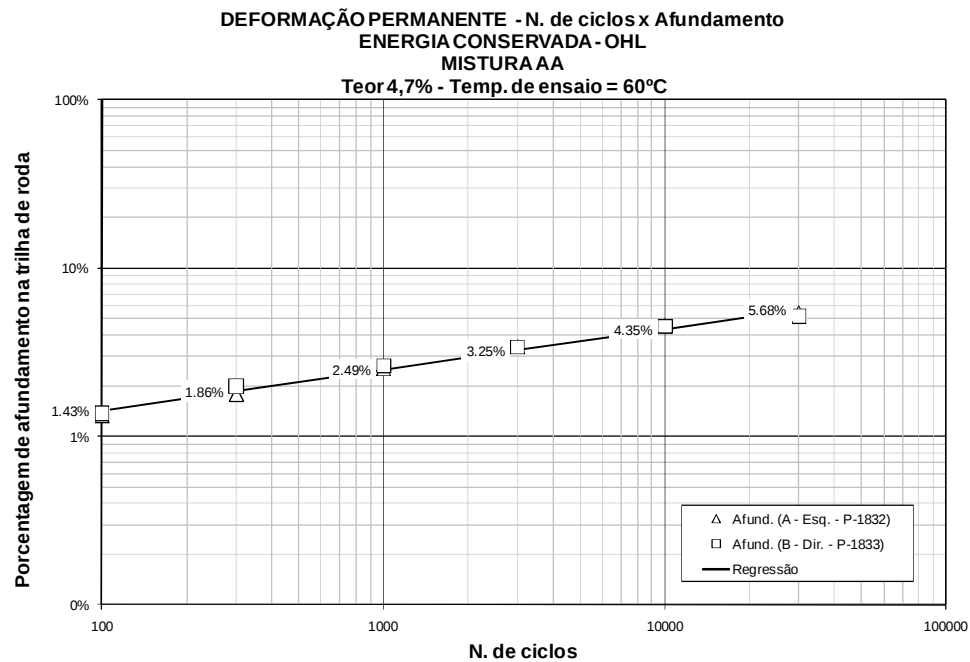


MISTURA Z – SPV 12,5mm e RET

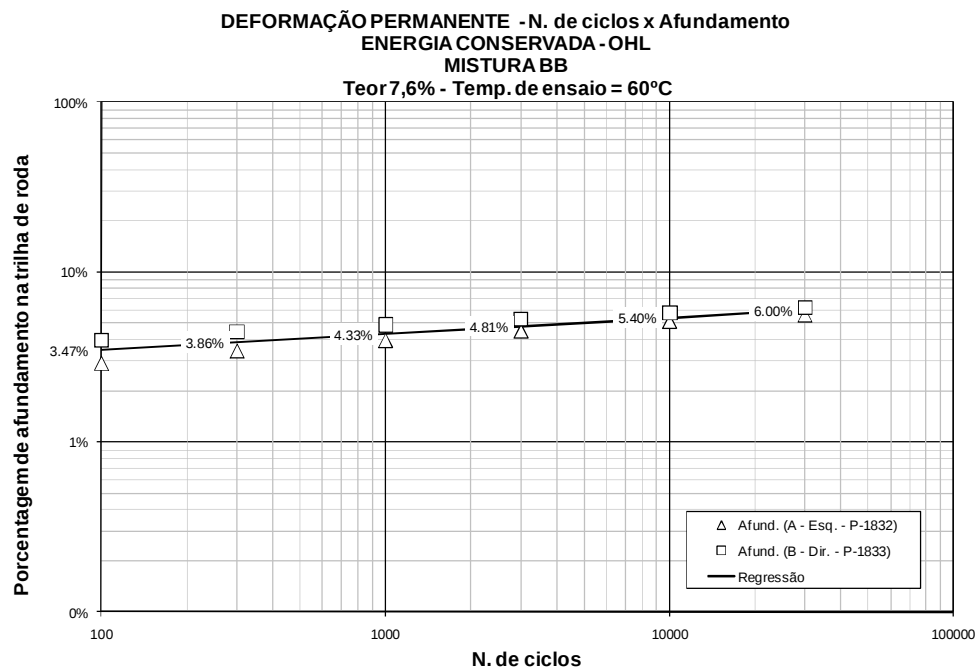




MISTURA AA – SPV 19mm e RET

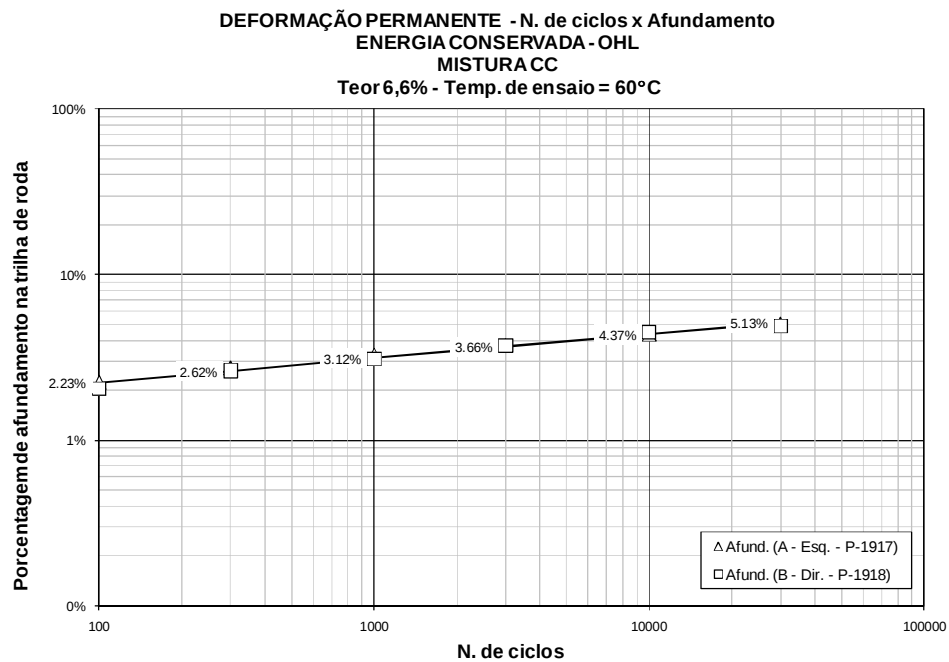


MISTURA BB – SMA 8S e RET

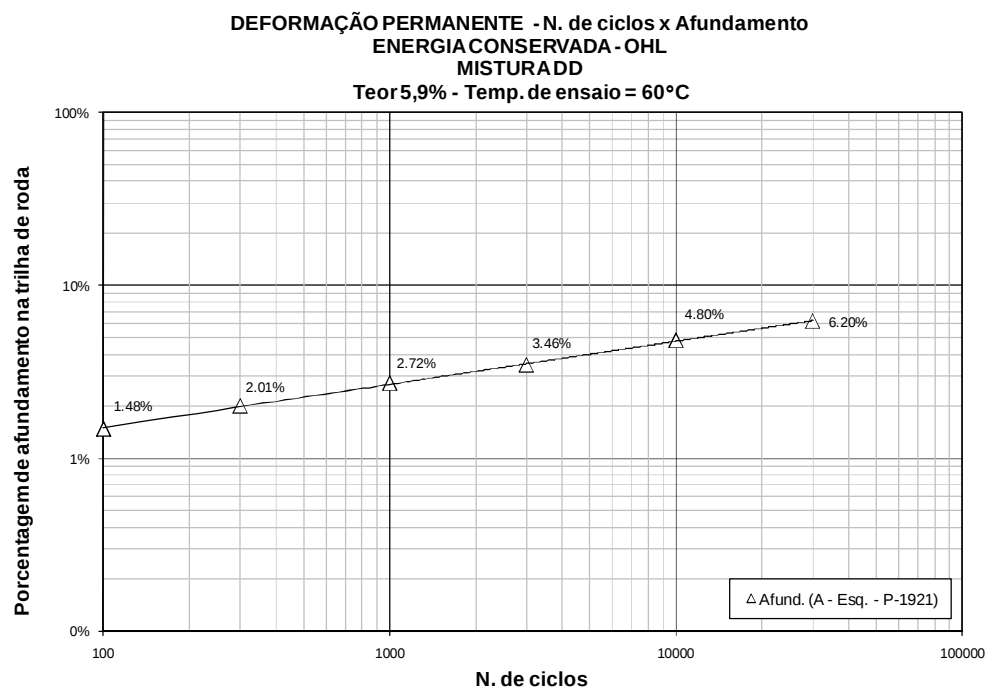




MISTURA CC – SMA 11S e RET

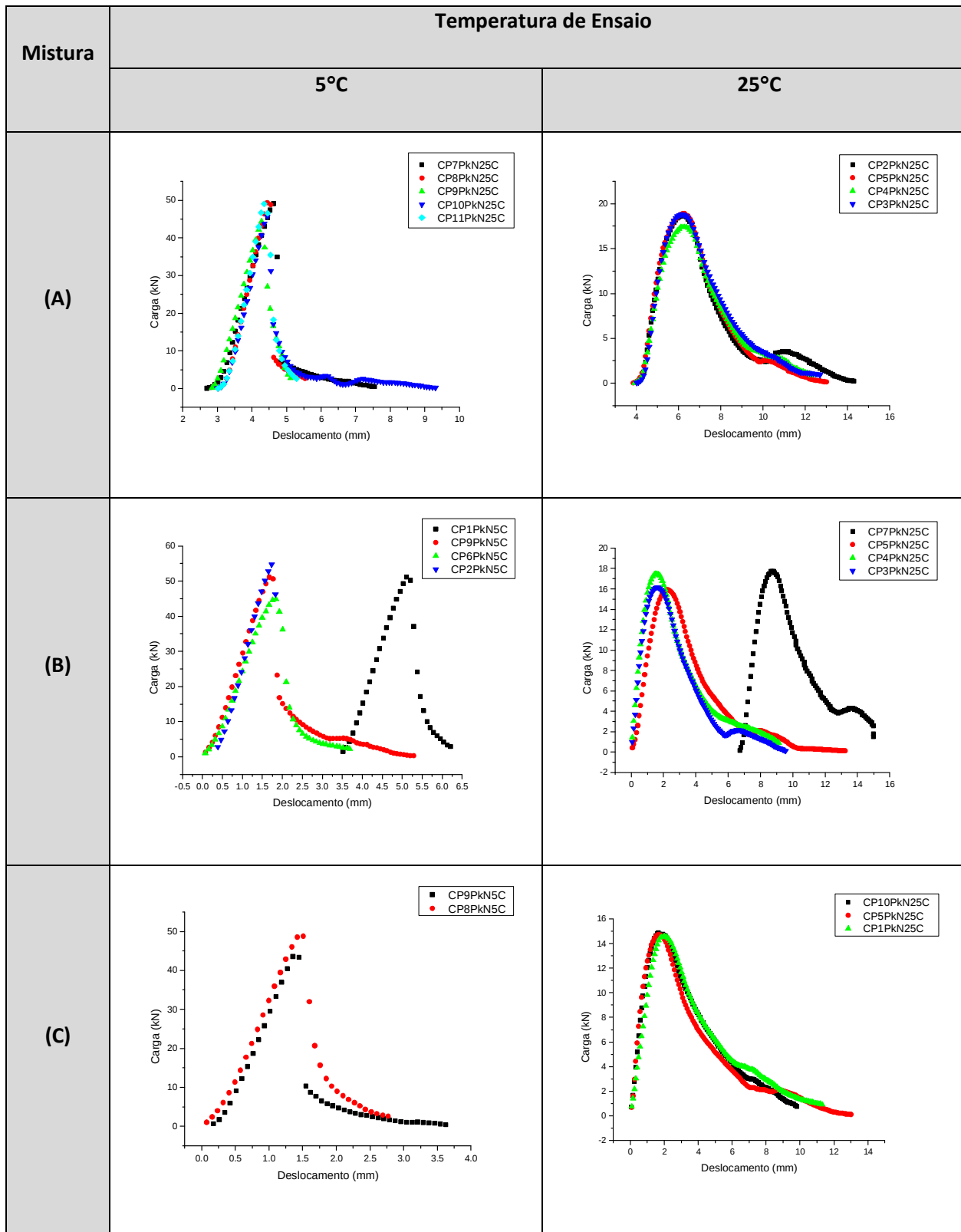


MISTURA DD – GAP 12,5mm e RET



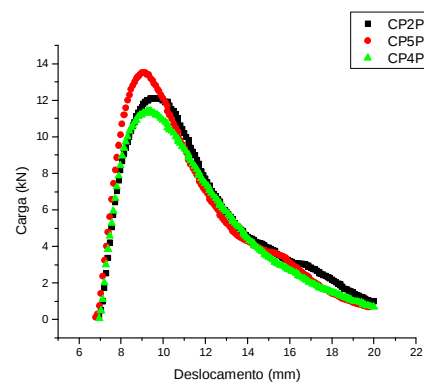
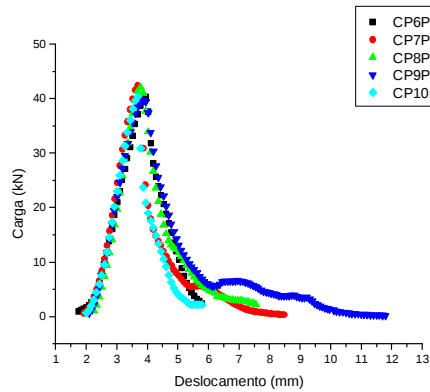


ANEXO B – GRÁFICOS DE CARGA X DESLOCAMENTO
(Ensaio de resistência à tração por compressão diametral)

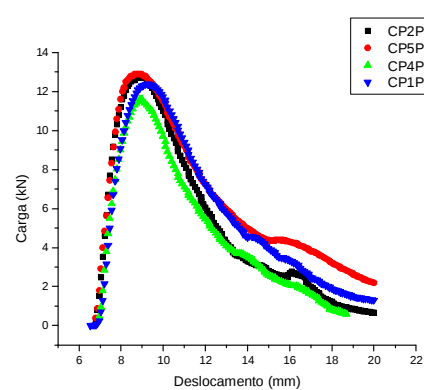
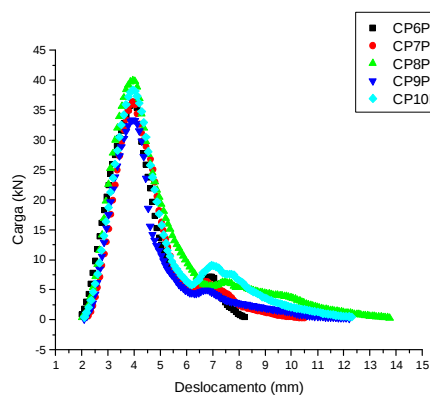




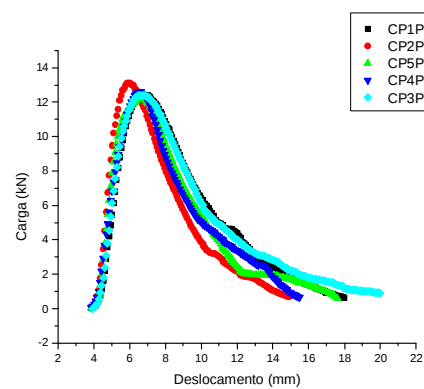
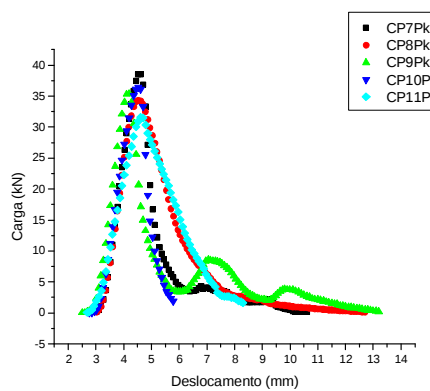
(D)

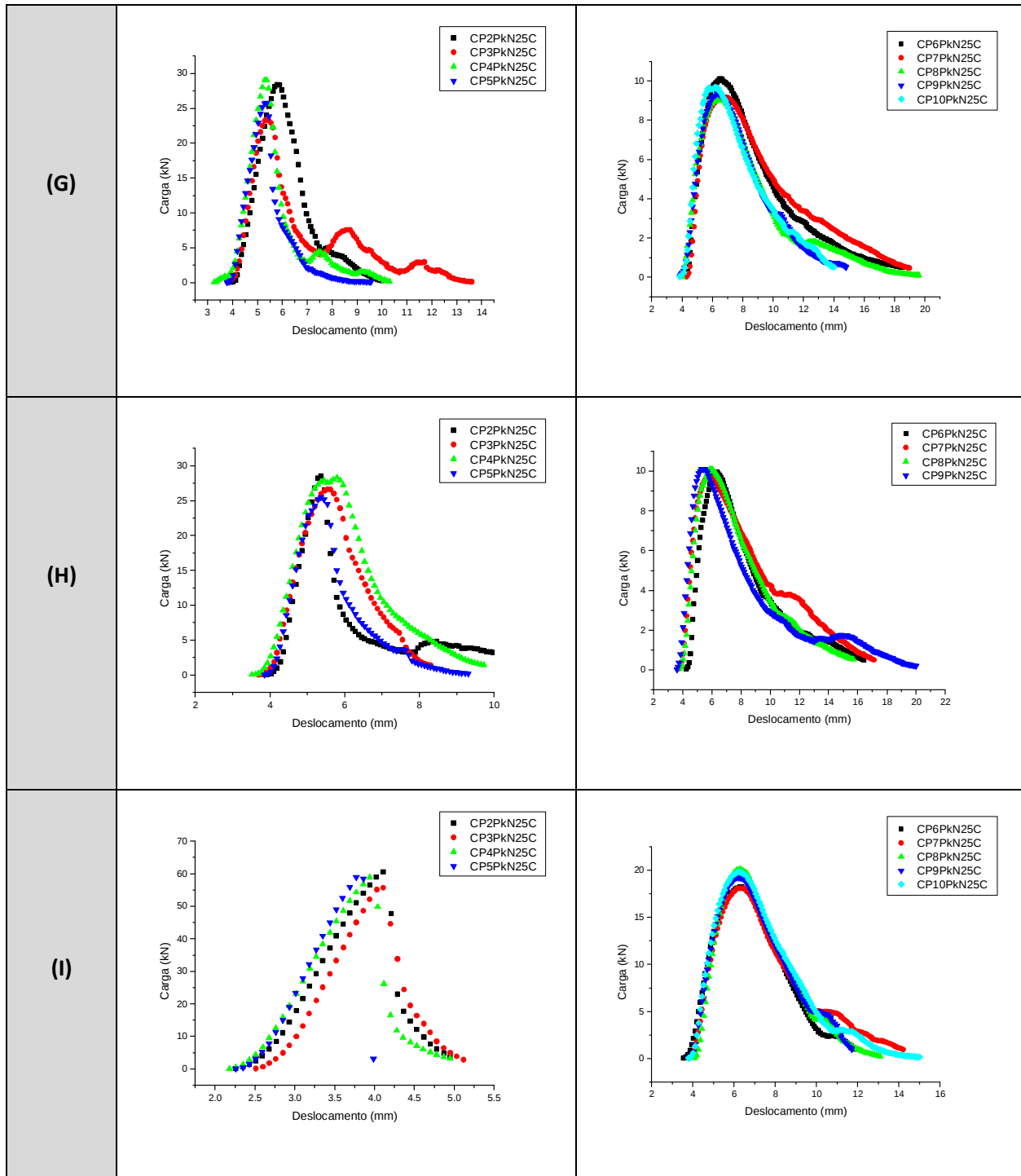


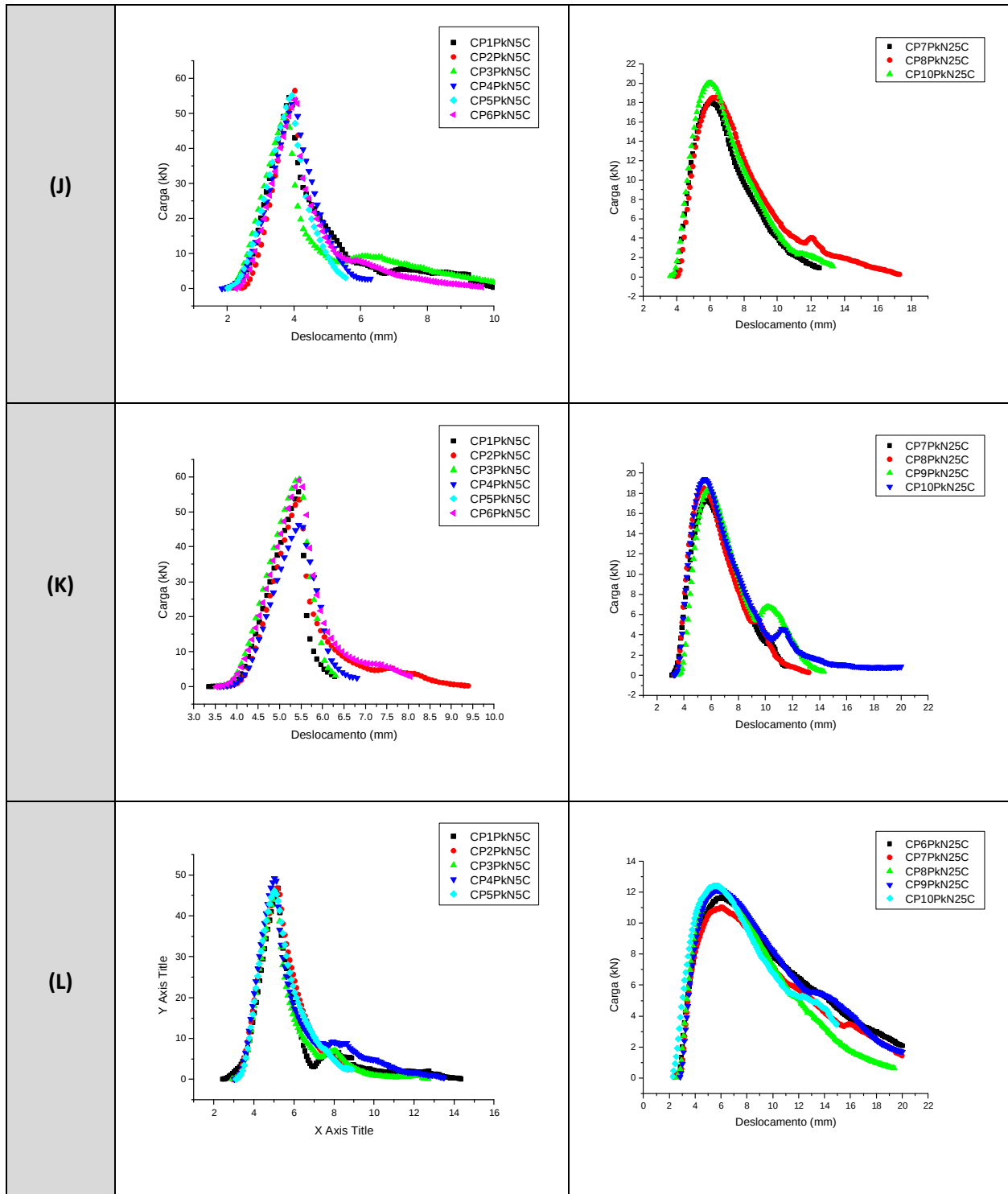
(E)

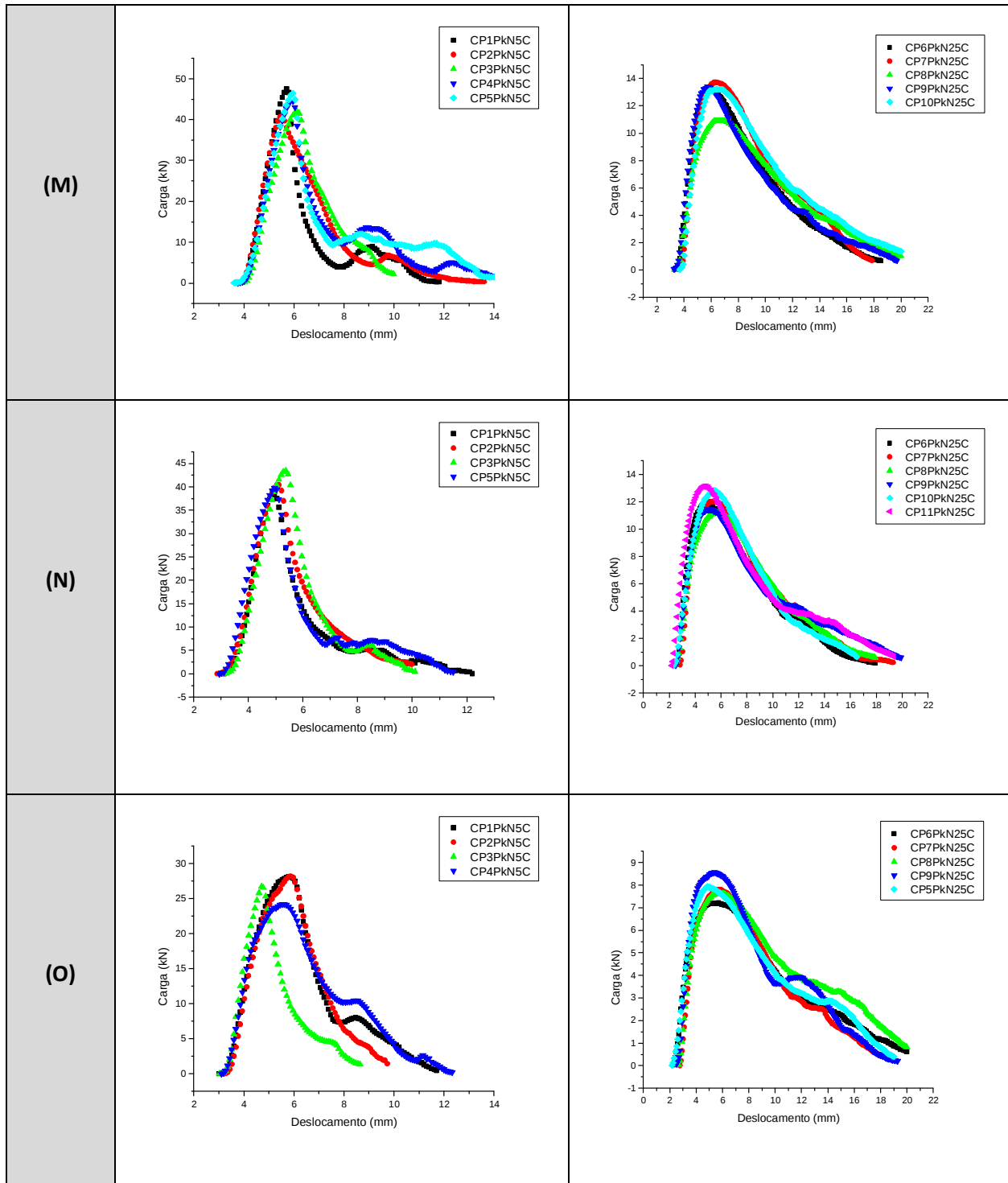


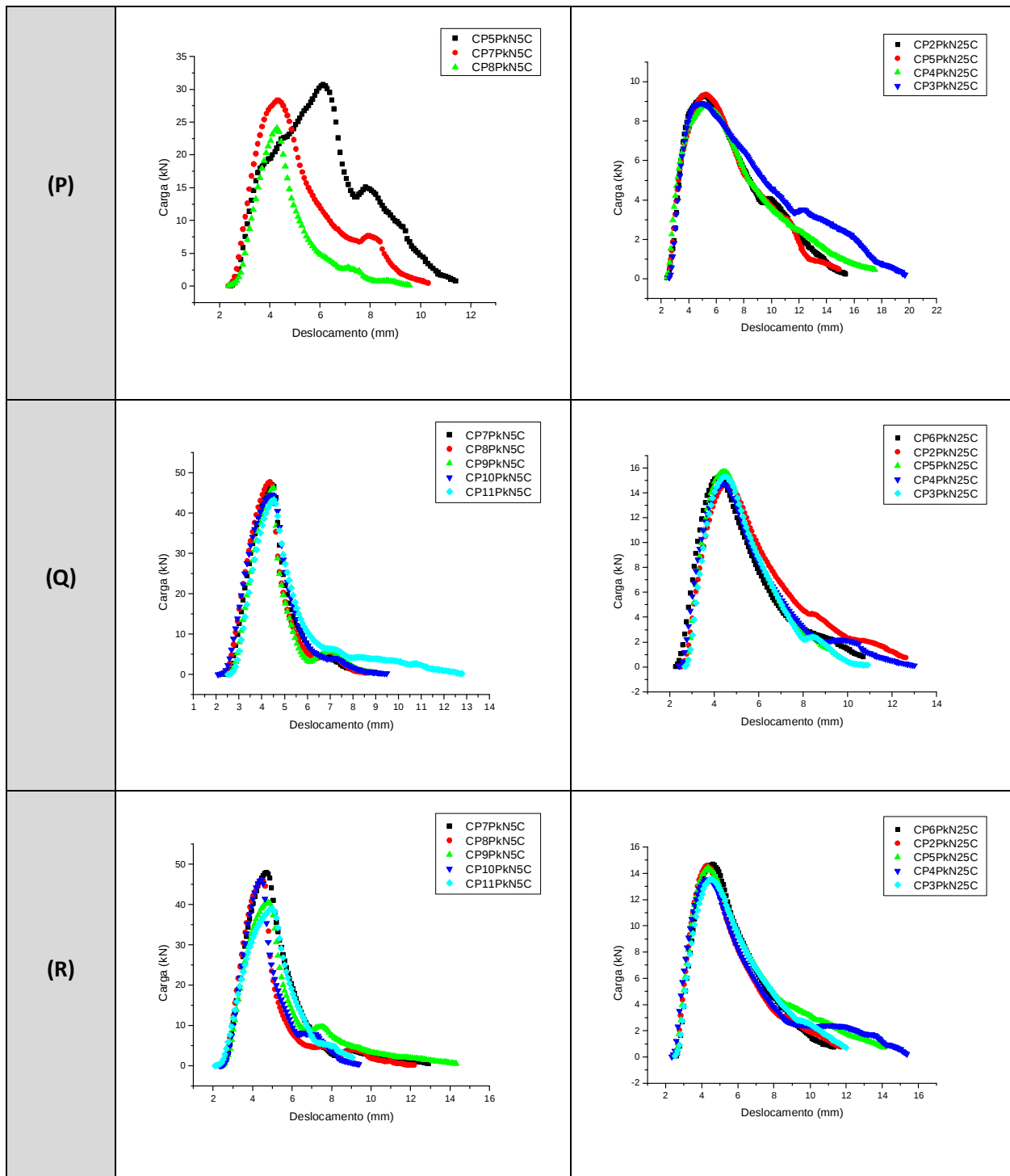
(F)

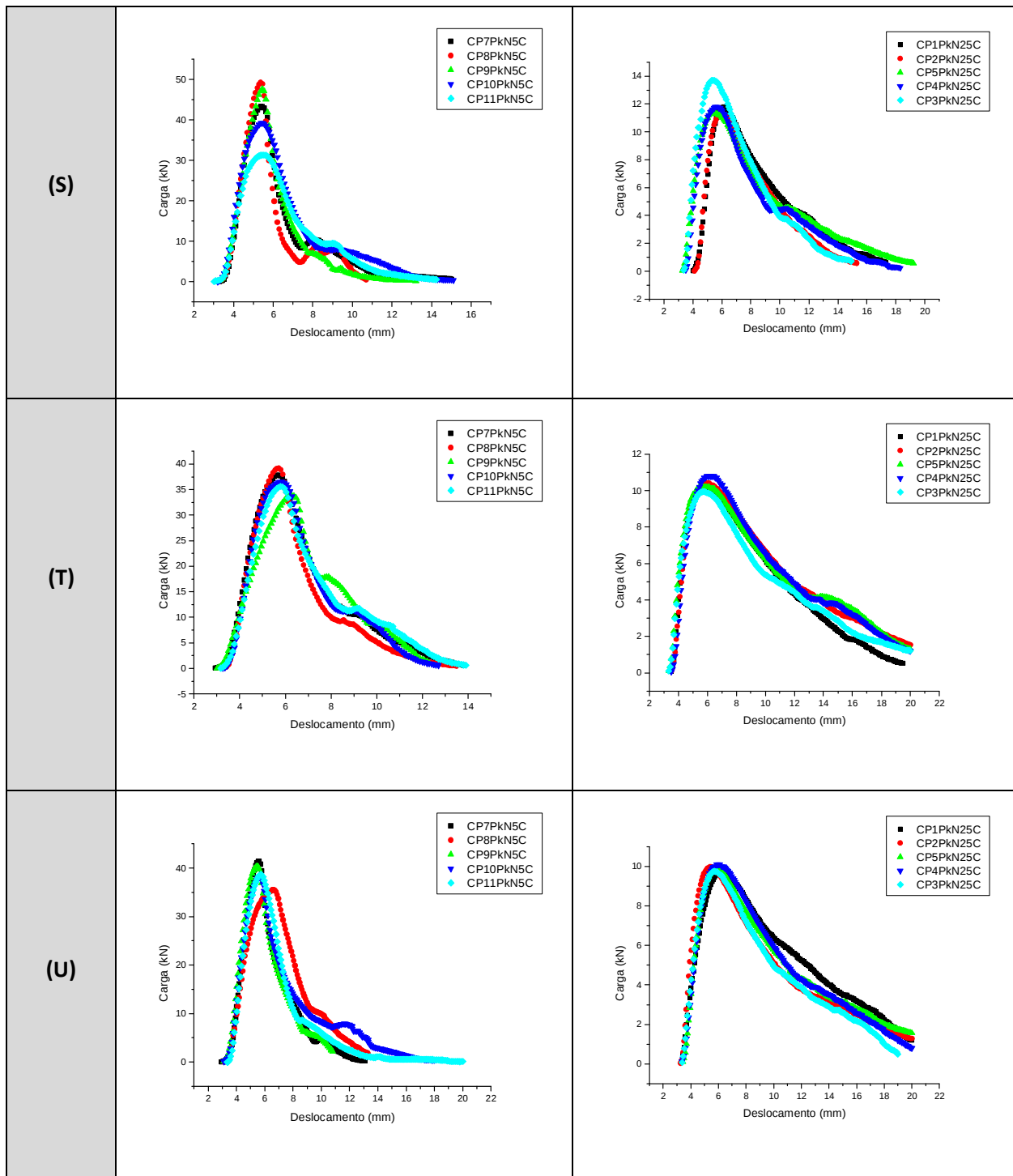


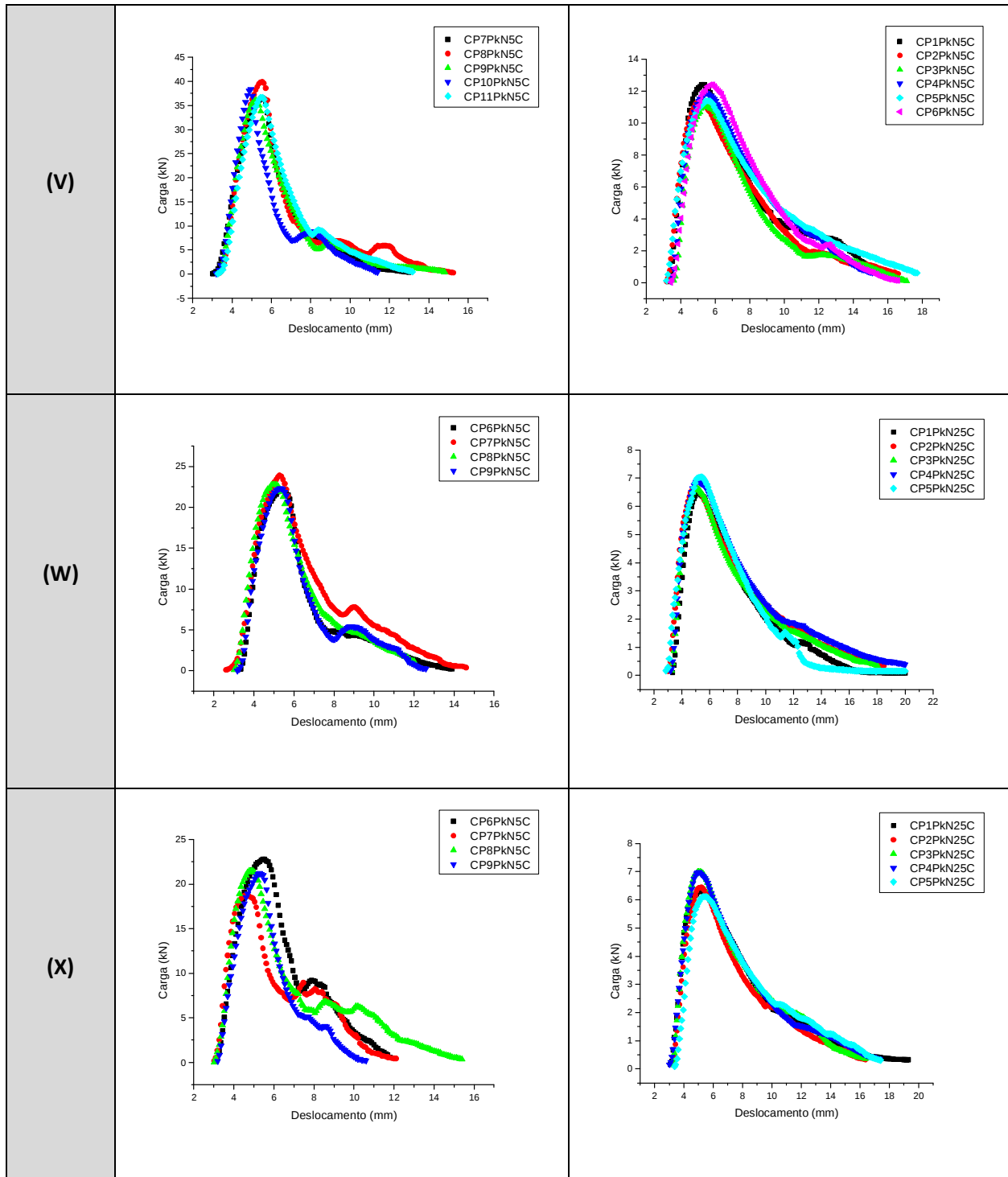


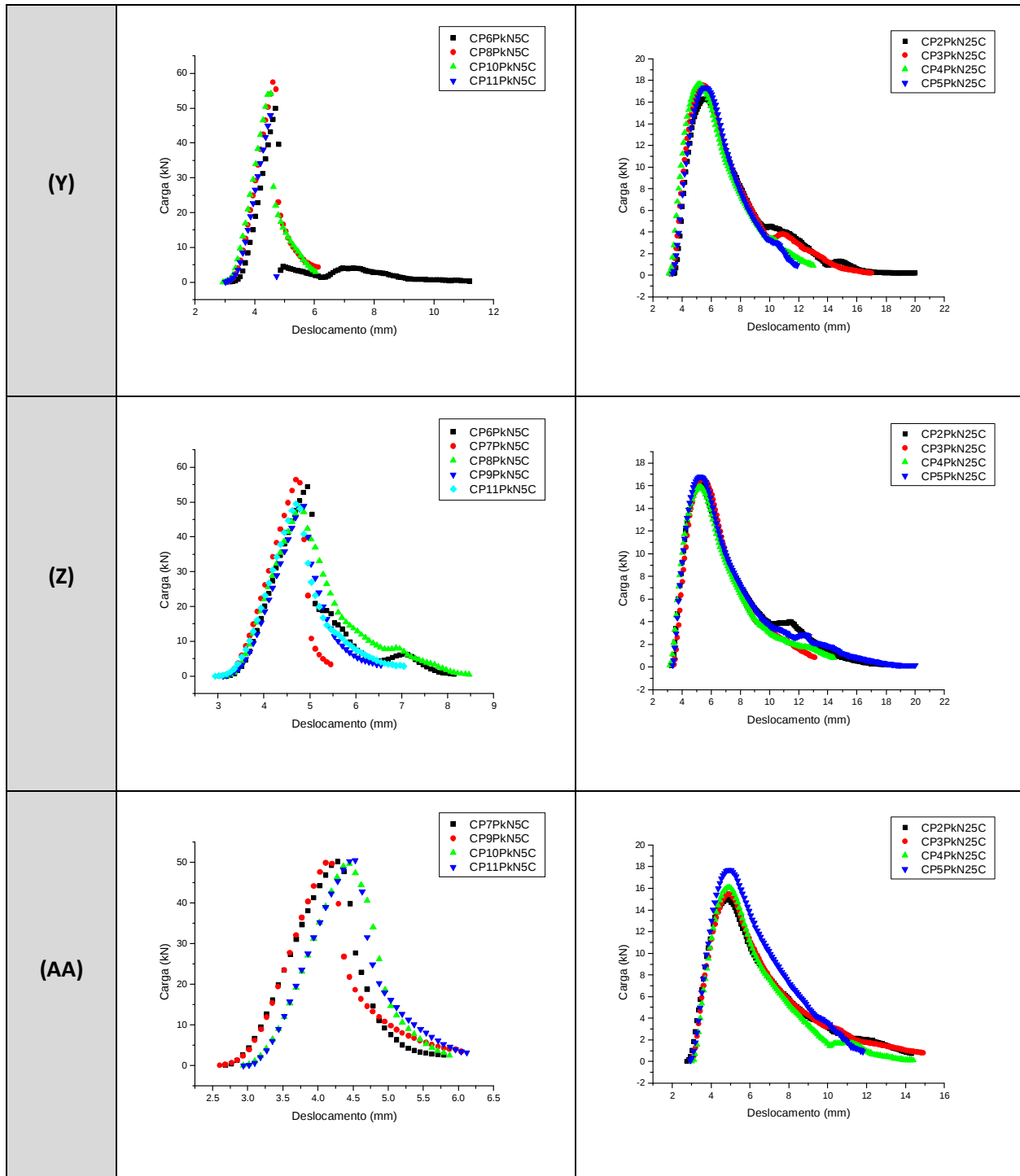


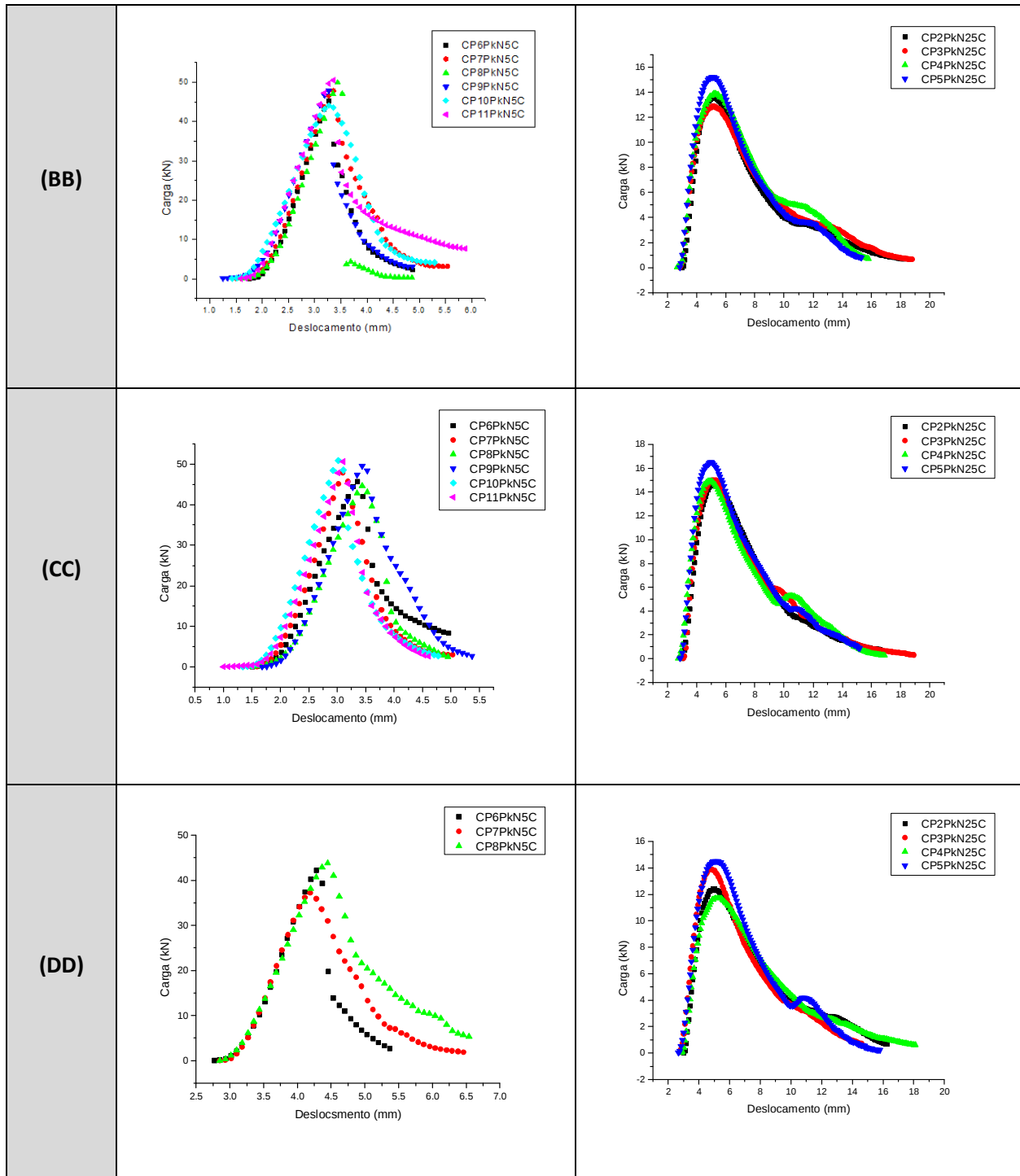






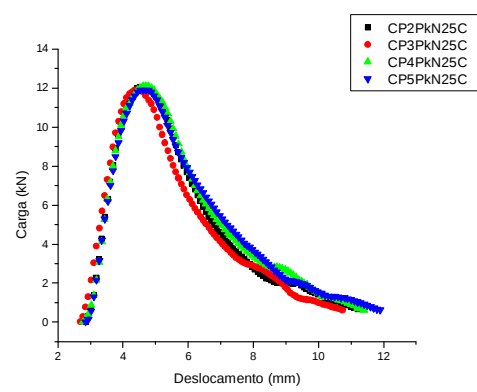
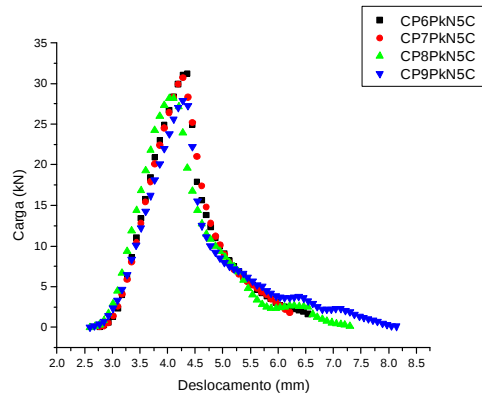








(EE)



(FF)

