

6 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresenta-se neste capítulo, os resultados dos ensaios tradicionais utilizados para caracterização das amostras de asfalto-borracha (penetração, ponto de fulgor e ponto de amolecimento), assim como dos ensaios Superpave (viscosidade aparente Brookfield, cisalhamento dinâmico e rigidez à fluência na flexão). É importante mencionar que para os ensaios convencionais (penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor) foram ensaiadas três réplicas, enquanto que para os ensaios Superpave (DSR e viscosidade Brookfield) foram ensaiadas duas réplicas. Apresenta-se, também, uma análise estatística dos resultados, onde foram desenvolvidos modelos estatísticos que representam o comportamento do ligante asfalto-borracha em função dos fatores considerados.

6.1 - ENSAIOS CONVENCIONAIS

Os resultados dos ensaios tradicionais são apresentados em forma de tabelas e gráficos.

6.1.1 - PENETRAÇÃO

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência dos materiais asfálticos. O comportamento previsto é que a adição de borracha torne o ligante mais consistente, resultando em valores mais baixos de penetração em

função do aumento do teor de borracha nas misturas. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 6.1 e na Figura 6.1, no entanto, mostram que a penetração aumenta até um teor de 12 %, estabilizando ou diminuindo para os teores de 18 e 24 % de borracha.

TABELA 6.1 – Resultados de penetração (1/10 mm) das misturas asfalto-borracha (temperatura de ensaio: 25° C)

Penetração (1/10 mm)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
6	39	40	42	41	39	39	36	36	38	35	36	37
12	59	60	60	48	46	47	51	52	51	46	47	46
18	43	44	42	46	47	46	40	41	39	49	49	49
24	48	47	49	47	46	46	47	48	46	48	49	50

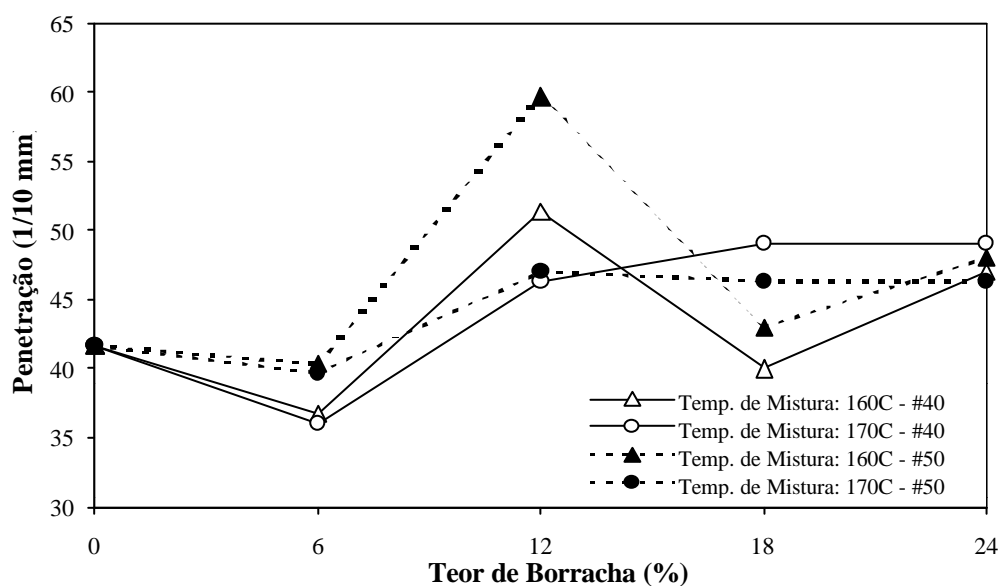


FIGURA 6.1 - Efeito do teor de borracha na penetração do ligante asfalto-borracha

Comparando-se os resultados da Tabela 6.1 com os limites estabelecidos pelas especificações apresentadas no capítulo 4, para as condições climáticas no

Estado de São Paulo, todas as amostras de ligante asfalto-borracha atendem aos limites mínimo (25) e máximo (75) da especificação ASTM D6114 (ASTM, 1997) e que apenas as amostras contendo 12% atendem aos limites estabelecidos por BAKER RUBBER Inc. (limites mínimo de 50 e máximo de 100) (HEIZTMAN, 1992b).

6.1.2 - PONTO DE AMOLECIMENTO

O ponto de amolecimento consiste no valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. A Tabela 6.2 apresenta os resultados de ponto de amolecimento (Método do Anel e Bola). A Figura 6.2 ilustra o efeito do teor de borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.

TABELA 6.2 – Resultados de ponto de amolecimento (°C)

Ponto de Amolecimento (°C)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
6	54	55	53	52	54	50	55	56	54	53	55	54
12	57	59	58	61	60	61	59	59	58	57	56	58
18	64	63	61	60	62	61	64	64	64	60	59	61
24	65	64	66	68	67	66	65,5	66	65	64	66	65

Pode-se observar na Figura 6.2 que o ponto de amolecimento é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha. Comparando-se o ponto de amolecimento das amostras com e sem borracha, ocorre uma melhoria nas características do ligante asfáltico com a adição da borracha. De acordo com as especificações, verifica-se que todas as amostras atendem ao limite mínimo (de 49°C) estabelecido por BAKER RUBBER Inc. (HEIZTMAN, 1992b) e

que apenas algumas réplicas dos ensaios executados com 6% de borracha apresentam valores abaixo do limite mínimo de 54,4°C exigido pela ASTM D6114 (1997).

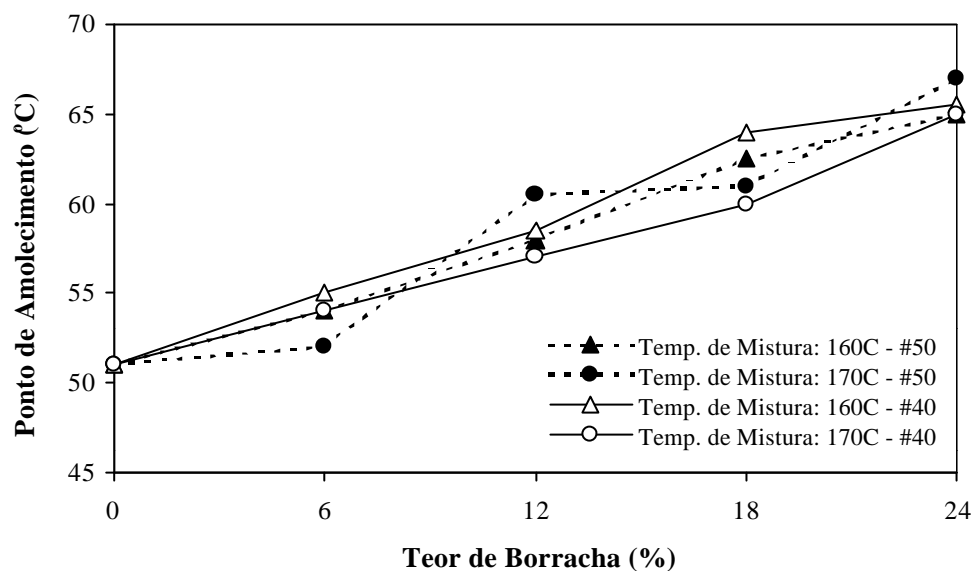


FIGURA 6.2 - Efeito do teor de borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

6.1.3 - PONTO DE FULGOR

O ensaio de ponto de fulgor tem como objetivo garantir a segurança durante o transporte e manuseio dos materiais asfálticos. A Tabela 6.3 e a Figura 6.3 apresentam os resultados de ponto de fulgor das misturas asfalto-borracha.

TABELA 6.3 - Resultados de ponto de fulgor (°C) das misturas asfalto-borracha

Ponto de Fulgor (°C)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289
6	266	264	265	278	279	277	284	283	282	281	280	282
12	315	319	317	304	305	303	290	291	292	295	297	296
18	294	296	292	297	293	292	308	306	310	300	299	298
24	294	295	290	296	295	291	298	297	299	295	298	301

Durante a realização dos ensaios pôde-se verificar que, após um determinado tempo de aquecimento da mistura, formava-se uma película na superfície e só ocorriam centelhas quando a amostra era agitada com uma espátula. Mesmo com essa alteração no procedimento de ensaio, visando eliminar o efeito da película que bloqueava a liberação dos vapores, os resultados mostram que a adição de borracha, independentemente da temperatura de mistura, do tamanho das partículas e do teor de borracha, aumenta o ponto de fulgor (de 289°C, para o ligante sem borracha, a até 317°C).

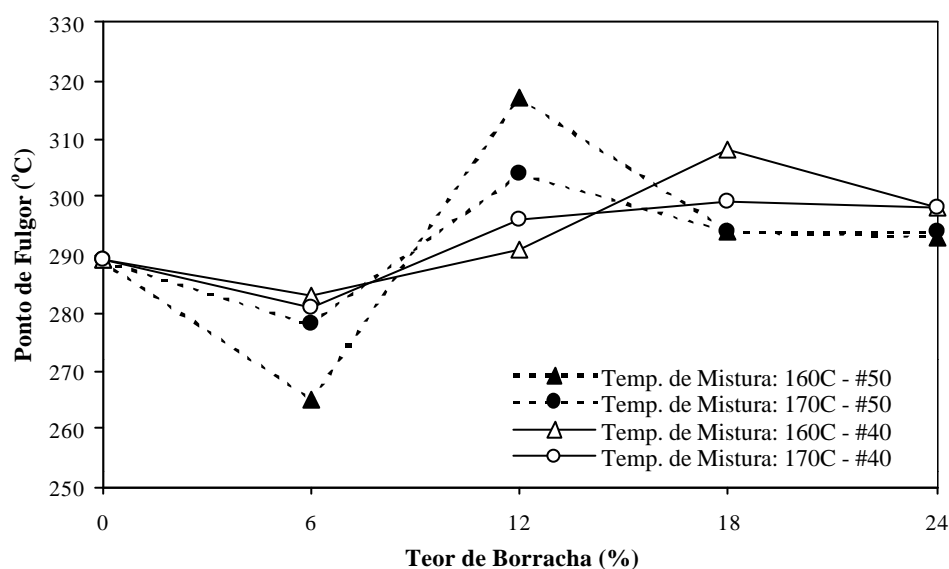


FIGURA 6.3 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha

Todas as amostras apresentaram valores superiores aos limites estabelecidos pela especificação ASTM D6114 (de 232,2°C) e pela especificação Superpave (de 230°C), que também considera o ensaio do Ponto de Fulgor. Constata-se, portanto, que a adição de borracha não é um fator que compromete a segurança, tendo inclusive, um efeito benéfico.

6.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SUPERPAVE

6.2.1 – VISCOSIDADE APARENTE (BROOKFIELD)

A viscosidade dos ligantes asfálticos é, geralmente, especificada a 60 e a 135°C. A viscosidade a 60°C é utilizada para classificar o asfalto, por ser próxima à máxima temperatura que o pavimento suportará quando em serviço. A viscosidade a 135°C serve para prover informação sobre a melhor temperatura de mistura em usina e de lançamento e compactação no campo.

As especificações propostas pela ASTM D6114 (ASTM, 1997) e por BAKER RUBBER Inc. (HEIZTMAN, 1992b) estabelecem que a viscosidade aparente do ligante asfalto-borracha deve ser determinado a uma temperatura de 175°C, pois esta é a temperatura mais utilizada para o preparo do ligante asfalto-borracha em usina.

As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os resultados de viscosidade das amostras asfalto-borracha com equipamento Brookfield para temperaturas de 175 e 135°C, respectivamente.

TABELA 6.4 – Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 175°C)

Viscosidade (cP)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
6	129	129	128	125	127	125	128	128	128	126	126	126
12	243	243	242	243	241	243	495	490	485	251	251	251
18	980	955	933	719	711	703	782	775	764	235	233	230
24	2078	2123	2073	1892	1857	1907	2351	2184	2287	1902	1811	2225

TABELA 6.5 – Resultados do ensaio de viscosidade (cP) - equipamento Brookfield (temperatura de ensaio: 135°C)

Viscosidade (cP)	Tamanho das Partículas de Borracha											
	# 50						# 40					
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)											
	160			170			160			170		
0	403	400	400	403	400	400	403	400	400	403	400	400
6	911	911	911	936	934	931	976	973	976	918	917	919
12	1485	1485	1485	1960	1893	1863	2574	2572	2554	1493	1490	1493
18	5012	4966	5023	3354	3349	3337	5531	5235	5676	2349	2342	2336
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

*impossibilidade de realização de ensaio.

Comparando-se os valores da Tabela 6.4 com os valores estabelecidos pelas especificações propostas pela ASTM D6114 e por BAKER RUBBER Inc., pode-se verificar que apenas as amostras contendo 24% de borracha moída apresentam valores acima do valor mínimo exigido pelas duas especificações (respectivamente, 1500 e 1000 cP).

Entretanto, considerando-se a especificação Superpave, que determina que a temperatura de ensaio é de 135°C, pode-se verificar que apenas as amostras contendo 6 e 12% de borracha apresentam valores abaixo do limite máximo estabelecido de 3000 cP (Tabela 6.5). Não foi possível determinar a viscosidade dos ligantes asfalto-borracha com 24% de borracha.

As Figuras 6.4 e 6.5 mostram o efeito dos fatores (granulometria e teor de borracha, temperatura de mistura) na viscosidade do ligante asfalto-borracha. As linhas tracejadas representam extrapolações.

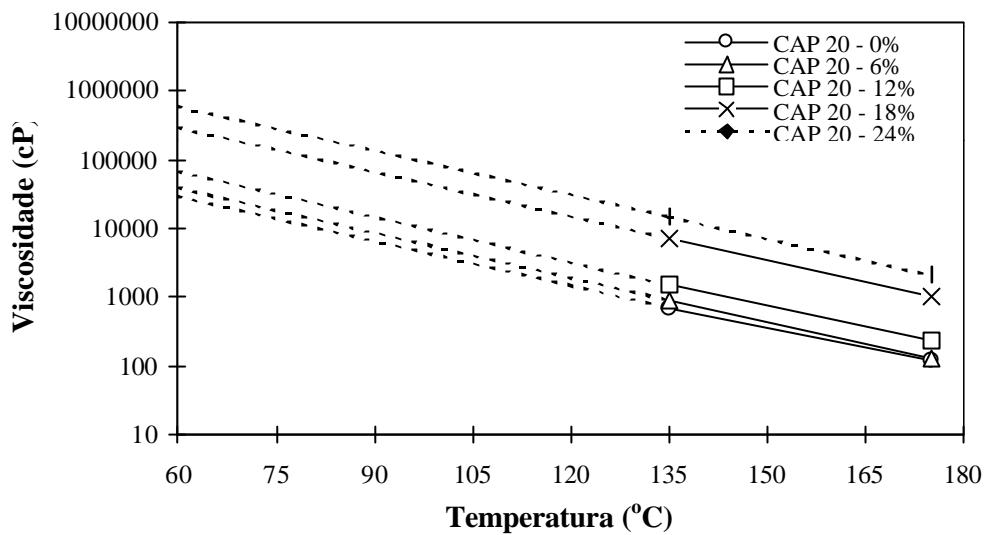


FIGURA 6.4 - Variação da viscosidade em função do teor de borracha

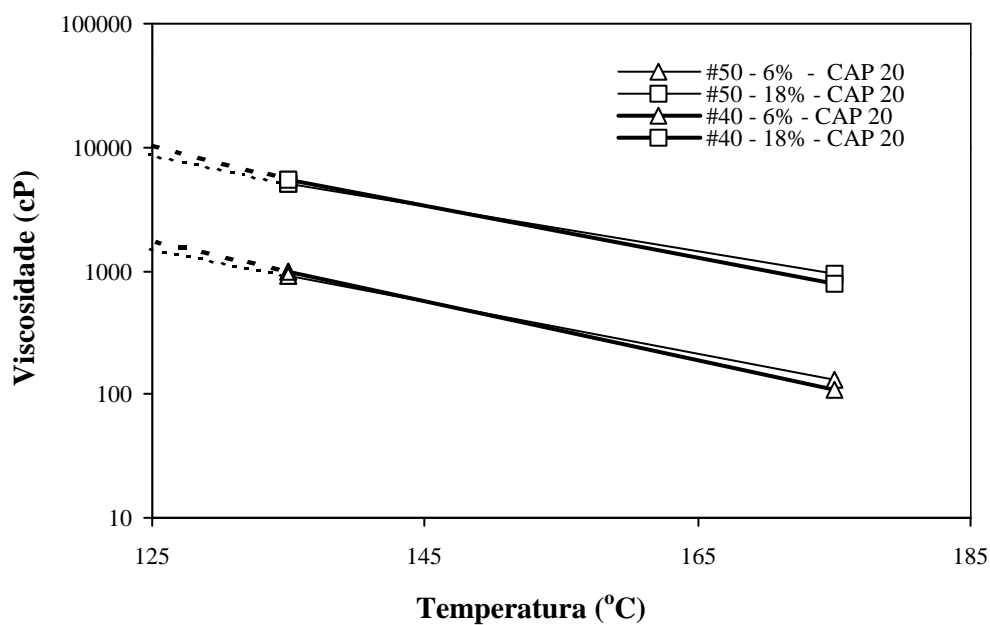


FIGURA 6.5 - Viscosidade do ligante asfalto-borracha em função do teor e da granulometria da borracha

6.2.2 – MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE VIRGEM

O módulo complexo (G^*) é a medida da resistência total do ligante asfáltico à deformação permanente, quando o material é exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento. O ângulo de fase (δ) indica a quantidade de deformação recuperável e não recuperável, apresentando valores menores quando o material é mais elástico, ou seja, mais resistente à formação de trincas por fadiga. Os resultados do ensaio DSR são apresentados nas Tabelas 6.6 a 6.8.

TABELA 6.6 – Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - G^* (Pa)
(temperatura de ensaio: 64°C)

G^* (Pa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	1678	1678	1678	1678	1678	1678	1678	1678
6	2548	2574	2776	2290	2958	2919	2867	2855
12	3750	3944	5544	5266	5734	5358	5223	3191
18	8914	8901	7419	7573	9213	8974	6733	6709
24	13770	13550	15210	15050	10580	11320	15240	14570

TABELA 6.7 – Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - δ (graus)

d (graus)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6
6	85,6	85,7	85,3	85,7	85,1	85,1	84,8	84,8
12	78,0	77,8	75,2	75,4	73,3	73,5	74,8	74,6
18	66,9	66,2	70,6	70,5	67,5	67,5	70,8	70,4
24	58,8	59,6	57,7	57,5	65,6	65,2	61,2	60,4

TABELA 6.8 – Resultados de ensaio DSR do ligante virgem - $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)

$G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura ($^{\circ}\text{C}$)							
	160		170		160		170	
0	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
6	2,6	2,6	2,8	2,3	3,0	2,9	2,9	2,9
12	3,8	4,0	5,7	5,4	6,0	5,6	5,4	3,3
18	9,7	9,7	7,9	8,0	10,0	9,7	7,1	7,1
24	16,1	15,7	18,0	17,8	11,6	12,5	17,4	16,8

As Figuras 6.6 e 6.7 apresentam a variação do G^* e do δ em função do teor de borracha, observando-se um aumento na resistência ao acúmulo de deformação permanente com o aumento do teor de borracha (Figura 6.8).

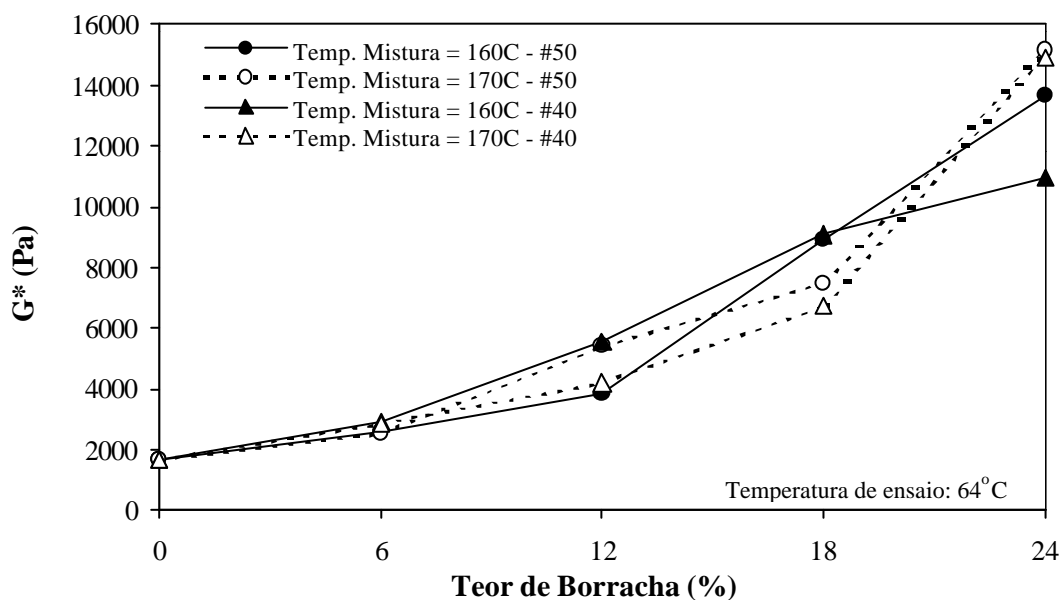


FIGURA 6.6 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento complexo

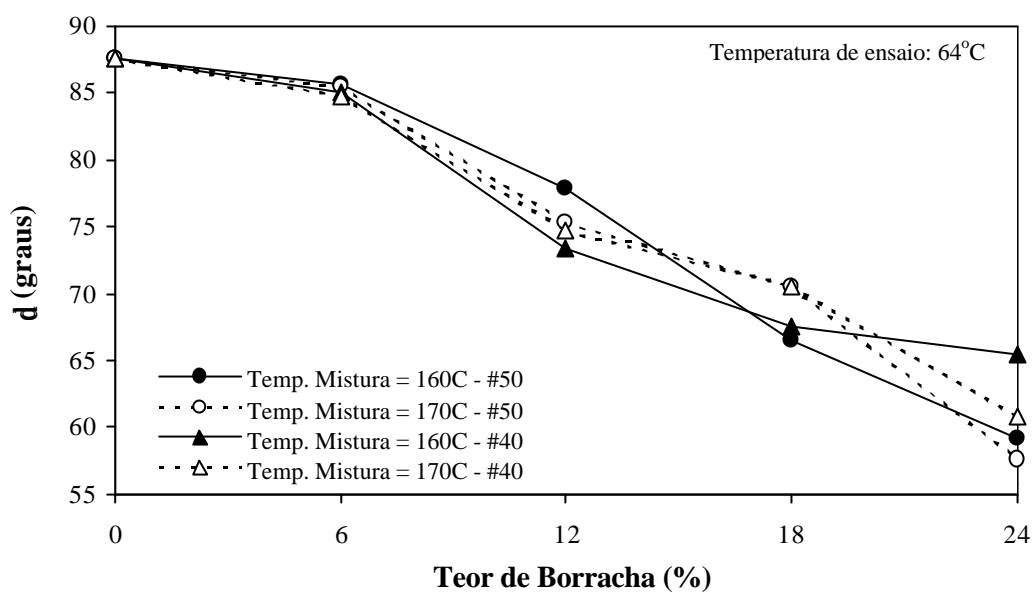


FIGURA 6.7 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ

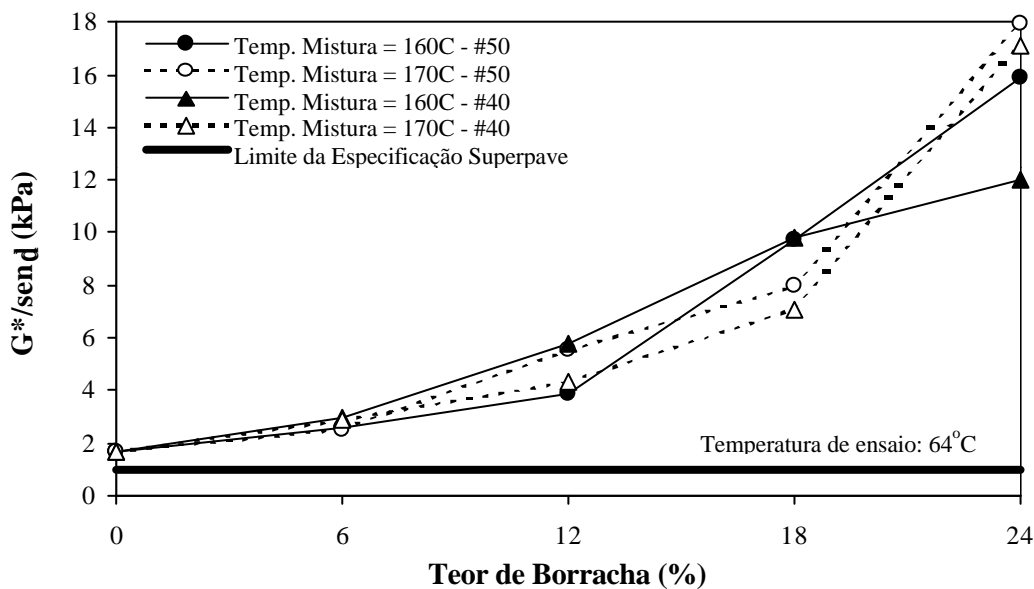


FIGURA 6.8 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente, representada pelo parâmetro ($G^*/\text{sen}\delta$)

6.2.3 – MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE APÓS ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO

O ensaio com o DSR para determinar o módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após o envelhecimento de curto prazo também é realizado para avaliar a resistência ao acúmulo de deformação permanente. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.9 a 6.11.

TABELA 6.9 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - G^* (Pa) (temperatura de ensaio: 64°C)

G^* (Pa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720
6	4168	4121	5142	4976	1168	1217	5875	7283
12	6649	5508	7849	9101	6088	6190	7284	8094
18	10520	10200	10370	9843	10860	11350	10643	10852
24	26480	27100	23840	20040	12500	11130	16100	-

TABELA 6.10 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - δ (graus)

d (graus)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2
6	83,3	83,3	81,2	81,7	84,1	83,8	78,9	79,5
12	75,4	77,4	70,5	71,2	75,3	74,4	73,3	70,3
18	63,9	63,9	68,3	66,9	63,8	62,8	64,6	64,6
24	48,9	48,7	47,4	51,8	60,3	60,1	58,2	-

TABELA 6.11 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de curto prazo - $G^*/\text{sen}\delta$ (kPa)

$G^*/\text{sen}\delta$ (kPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura ($^{\circ}\text{C}$)							
	160		170		160		170	
0	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
6	4,2	4,2	5,2	5,0	1,2	1,2	6,0	7,4
12	6,9	5,6	8,4	9,9	6,3	6,4	7,6	8,6
18	11,7	11,4	11,0	10,4	12,1	12,8	11,9	12,1
24	35,1	36,1	32,4	25,5	14,4	12,8	19,0	-

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam a variação do G^* e do δ em função do teor de borracha e a Figura 6.11 mostra o aumento na resistência ao acúmulo de deformação permanente com o aumento do teor de borracha.

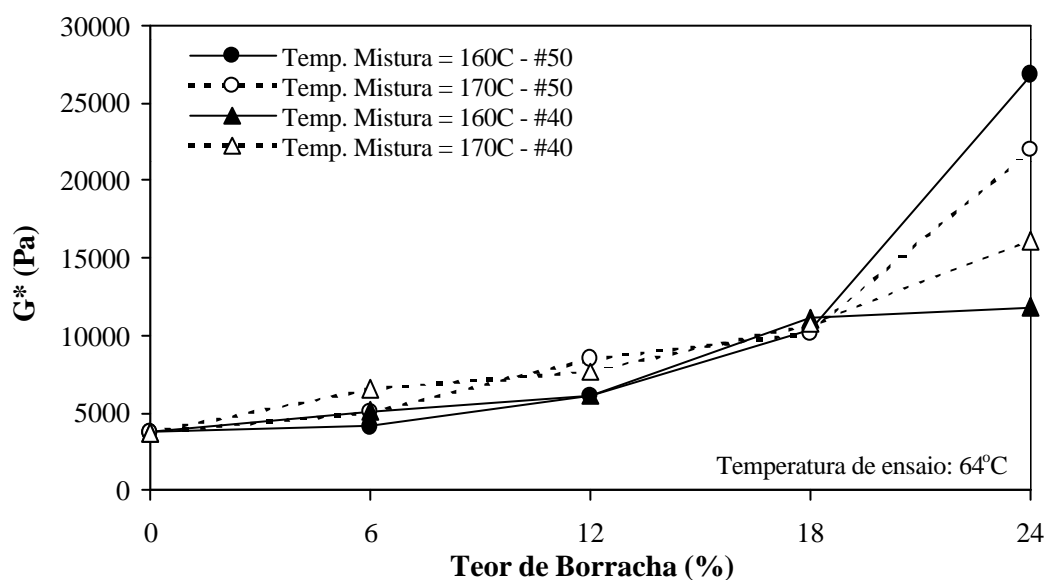


FIGURA 6.9 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico

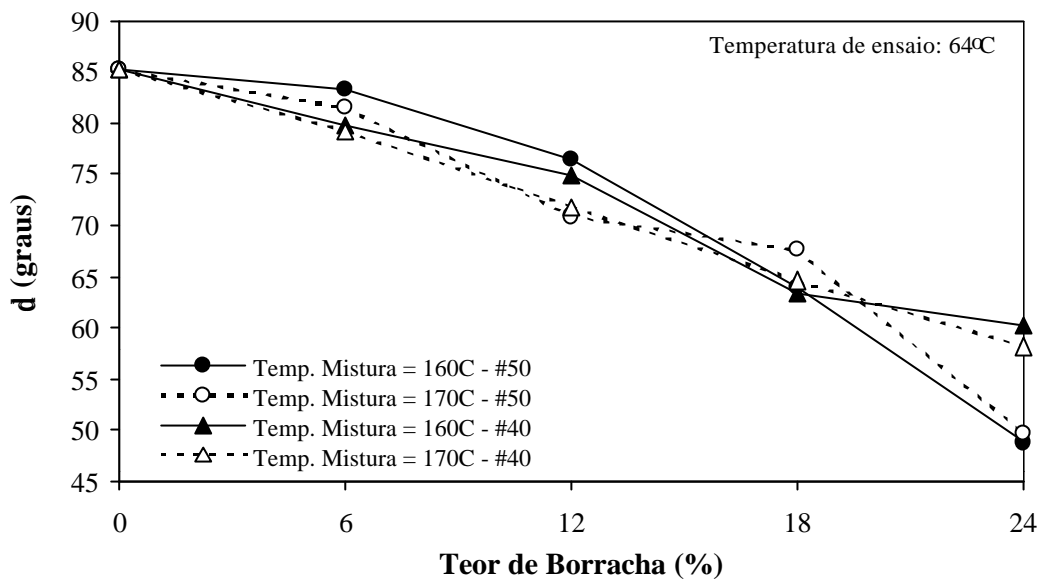


FIGURA 6.10 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ

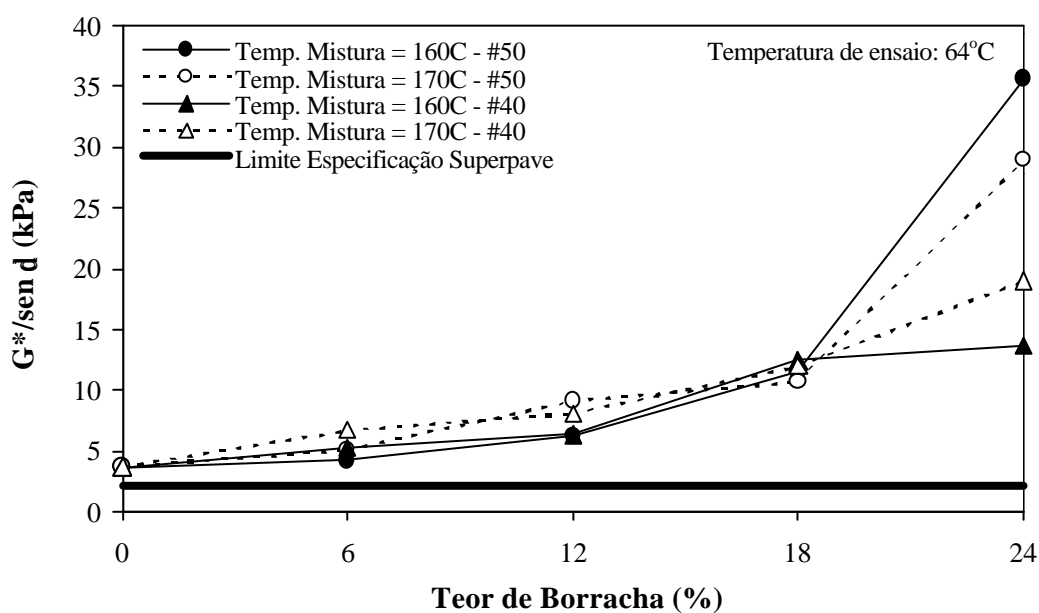


FIGURA 6.11 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente

Pode-se observar que as amostras com maior teor de borracha apresentam maiores valores de rigidez ($G^*/\text{sen}\delta$, Tabela 6.11), ou seja, são mais

resistentes ao acúmulo de deformação permanente. Deve-se destacar que todas as amostras apresentaram valores maiores que o limite mínimo da Especificação Superpave.

6.2.4 – MÓDULO DE CISALHAMENTO DINÂMICO DO LIGANTE APÓS ENVELHECIMENTO DE LONGO PRAZO

O ensaio com o DSR para determinar o módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após o envelhecimento de longo prazo é realizado para avaliar a resistência à formação de trincas por fadiga. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.12 a 6.14.

TABELA 6.12 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - G^* (Pa) (temperatura de ensaio: 31°C)

G^* (Pa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	4174000	3361000	4174000	3361000	4174000	3361000	4174000	3361000
6	4312000	4555000	2944000	3147000	3816000	2843000	2856000	2029000
12	1891000	1640000	2706000	2138000	1683000	1557000	2024000	1962000
18	863500	952500	1179000	1097000	995100	942600	1520000	1576000
24	746400	-	1295000	-	1004000	-	938500	857700

TABELA 6.13 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - δ (graus)

d (graus)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	52,7	53,4	52,7	53,4	52,7	53,4	52,7	53,4
6	52,4	52,5	51,7	51,7	53,0	50,6	52,9	52,2
12	51,1	51,0	48,9	48,8	49,4	49,0	49,5	49,3
18	46,6	45,8	46,2	46,0	46,3	46,6	48,3	48,3
24	44,3	-	42,3	-	43,4	-	44,0	43,6

TABELA 6.14 – Resultados de ensaio DSR após envelhecimento de longo prazo - $G^* \cdot \text{sen } \delta$ (kPa)

$G^* \cdot \text{sen } \delta$ (kPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura ($^{\circ}\text{C}$)							
	160		170		160		170	
0	2674	3353	2674	3353	2674	3353	2674	3353
6	3416	3613	2310	2469	3049	2198	2278	1603
12	1550	1274	2038	1609	1277	1174	1539	1487
18	627	682	850	789	720	685	1134	1176
24	521	-	871	-	689	-	652	592

As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam a variação do G^* e do δ em função do teor de borracha. A Figura 6.14 mostra o aumento na resistência à formação de trincas por fadiga com o aumento do teor de borracha, destacando-se que todas as amostras de ligante asfalto-borracha apresentaram rigidez inferior ao limite máximo da Especificação Superpave (5000 kPa).

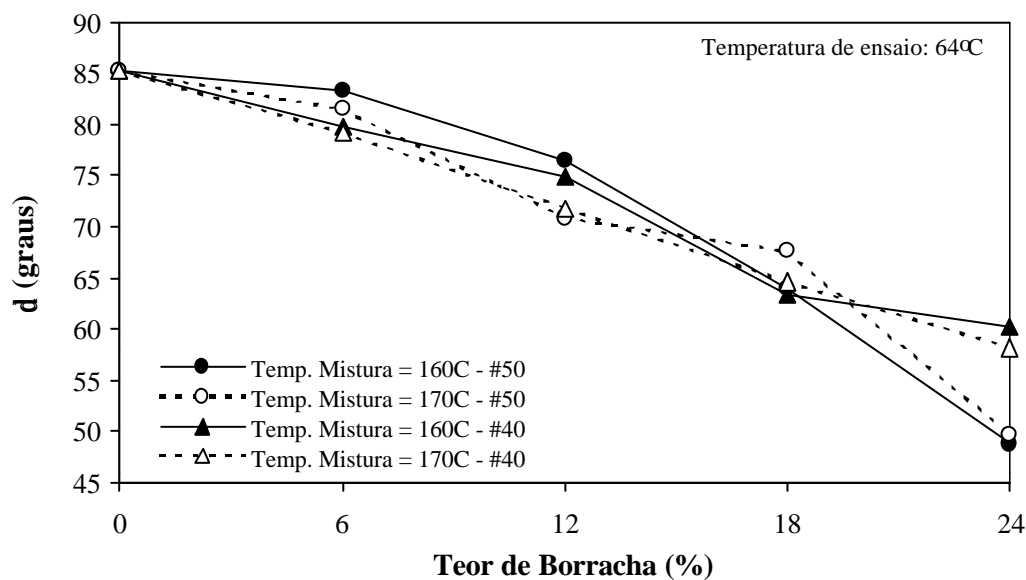


FIGURA 6.12 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico

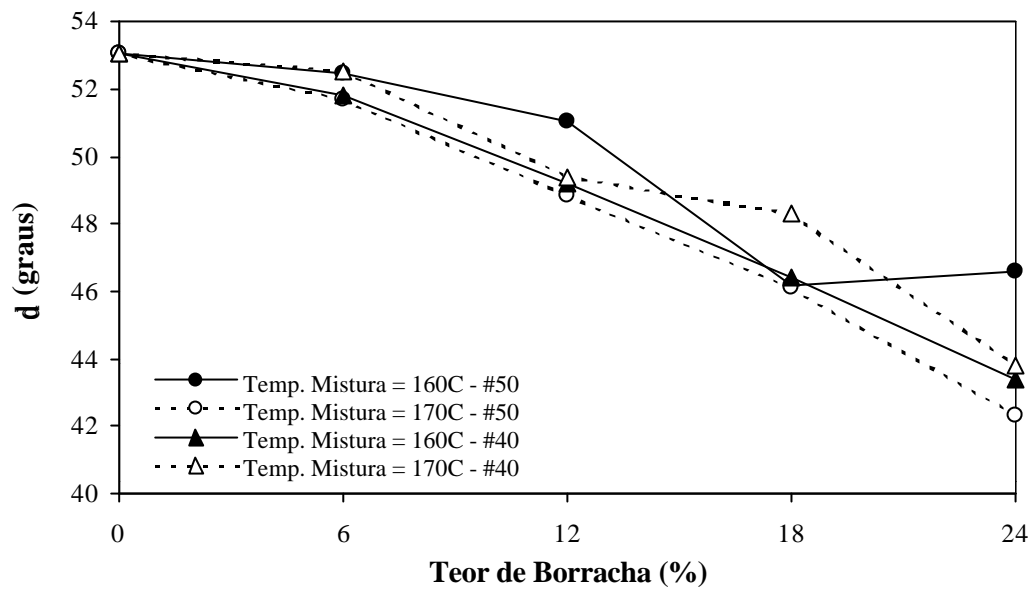


FIGURA 6.13 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, δ

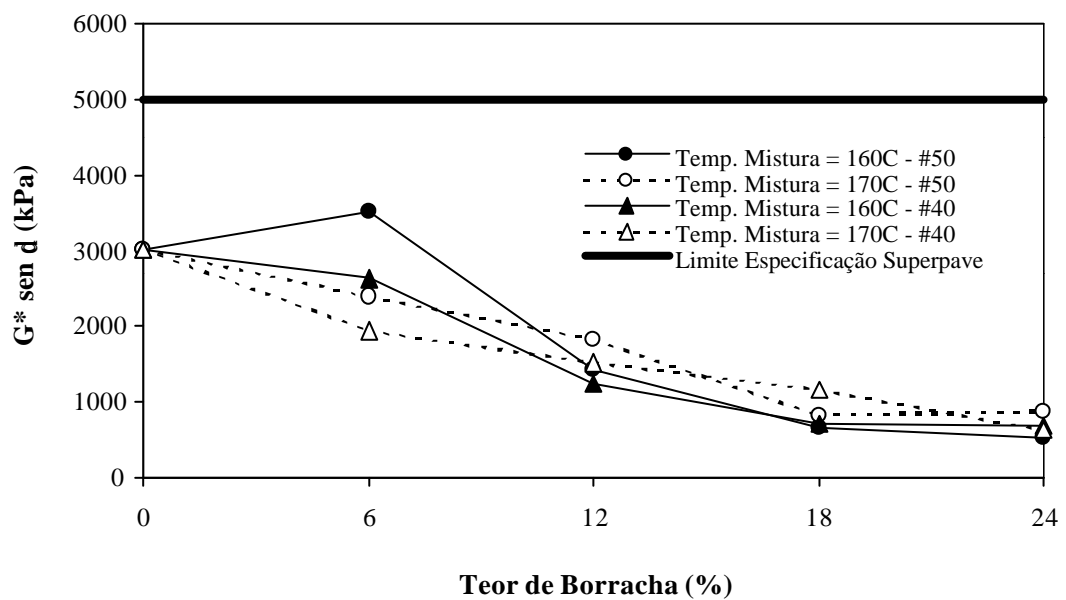


FIGURA 6.14 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga

6.2.5 - RIGIDEZ À FLUÊNCIA NA FLEXÃO

O ensaio realizado com o reômetro de fluência na flexão (BBR) avalia a resistência à formação de trincas por contração de origem térmica. Essa avaliação é feita a partir da rigidez (S) e do módulo de relaxação (m). De acordo com a especificação Superpave, a rigidez de ligantes asfálticos deve ser menor do que 300 MPa e o módulo de relaxação deve apresentar valores superiores a 0,300.

A Tabela 6.15 apresenta um resumo com os resultados de rigidez e a Tabela 6.16 apresenta um resumo com os resultados de módulo de relaxação. As Figuras 6.15 e 6.16 ilustram o efeito do teor de borracha na resistência de ligantes asfalto-borracha à formação de trincas por contração de origem térmica.

TABELA 6.15 – Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de S (temperatura de ensaio: 0°C)

S (MPa)	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
6			46,6	46,6	54,7	54,5	57,6	57,6
12	30,3	30,3	33,8	33,9	19,6	19,7	40,5	40,5
18	16,6	16,5	16,3	16,4	15,6	15,6	18,6	18,5

TABELA 6.16 – Resumo dos resultados do ensaio BBR: valores de m

m	Tamanho das Partículas de Borracha							
	# 50				# 40			
Teor de Borracha (%)	Temperatura da Mistura (°C)							
	160		170		160		170	
0	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460
6			0,425	0,425	0,430	0,430	0,416	0,416
12	0,496	0,496	0,488	0,488	0,441	0,441	0,509	0,509
18	0,359	0,359	0,372	0,372	0,371	0,371	0,275	0,275

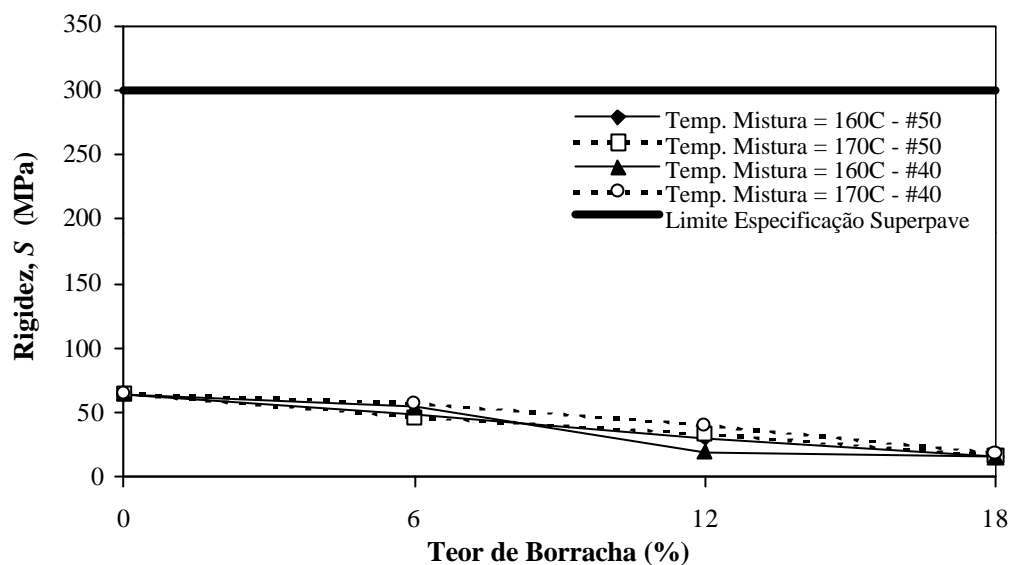


FIGURA 6.15 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica

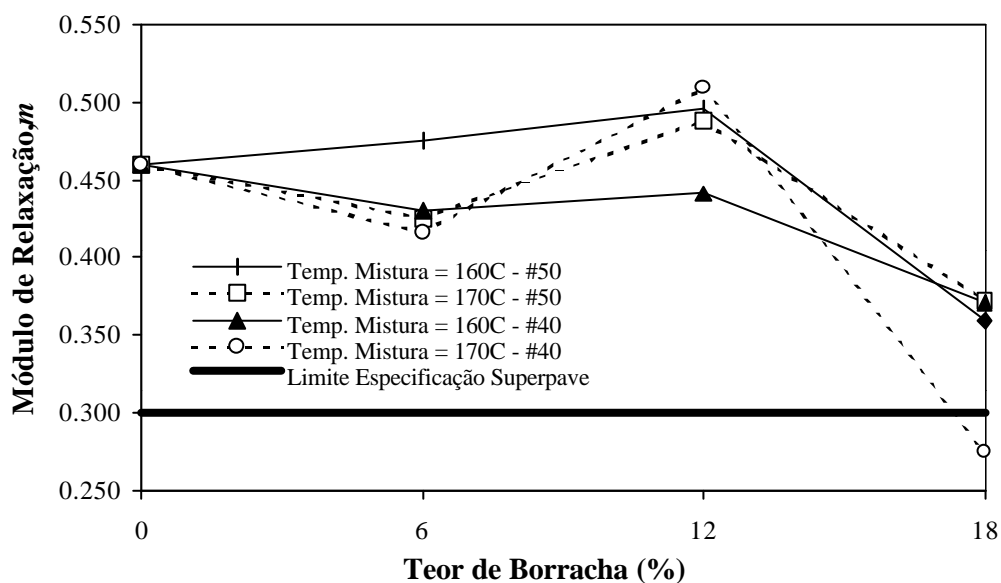


FIGURA 6.16 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por contração térmica

Pode-se observar pelas Figuras 6.15 e 6.16 que todas as amostras ensaiadas apresentaram valores bem abaixo do limite máximo de rigidez (300 MPa) e que apenas uma amostra com 18% de borracha apresentou valor abaixo do limite mínimo do módulo de relaxação (0,300).

6.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA - MODELOS ESTATÍSTICOS

Apresenta-se a análise dos efeitos dos fatores (teor de borracha, tamanho das partículas e temperatura de mistura) sobre as propriedades do ligante asfalto-borracha, visando identificar os fatores e interações mais significativos e obter modelos de desempenho para o processo em estudo.

Para determinar os modelos estatísticos foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) com os resultados de todos os ensaios. Através do teste *F de Snedecor* verificou-se a significância (99%) dos efeitos dos fatores e as interações dos fatores nas variáveis dependentes.

6.3.1 – TESTES DE SIGNIFICÂNCIA

Geralmente, sabe-se quais os fatores são importantes. O que dificulta as análises de um experimento é a presença de efeitos de fatores não controlados, que podem alterar em muito os resultados. Para evitar que isso ocorra, é necessário verificar se os resultados observados foram produzidos pelos fatores ou por uma mera variação aleatória.

Para aceitar um determinado fator como responsável pelas variações nas respostas de um experimento utilizam-se testes de significância. O nível de significância pode ser interpretado como a probabilidade de que seja nulo o efeito de uma dada variável sobre o modelo. Por exemplo, um nível de significância de 1% indica que a probabilidade de se obter a variação observada, por puro acaso, é de 1%.

Utiliza-se neste trabalho o teste *F de Snedecor*, que compara os valores de quadrados médios ou variâncias (*QM*) segundo a expressão:

$$F = \frac{QM_{\text{tratamento}}}{QM_{\text{resíduo}}} \quad (6.1)$$

Os quadrados médios dos fatores e das interações são obtidos a partir das somas de quadrados (SQ) e dos graus de liberdade (GL), segundo a expressão:

$$QM = \frac{SQ}{GL} \quad (6.2)$$

A determinação do nível de significância de um dado fator ou interação pode ser feita através da comparação do valor do quociente F daquele fator ou interação com um valor limite de F (F_{lim}). Os valores limites de F são apresentados na forma de tabelas e correspondem aos níveis de significância de 25, 10, 5, 1 e 0,1% (BOX *et al.*, 1978).

6.3.2 - CÁLCULO DAS VARIÂNCIAS

O roteiro para o cálculo das variâncias de cada fator e interação é apresentado em seguida e um exemplo de cálculo é apresentado no Anexo D.

a) Soma de Quadrados Total

A soma de quadrados total é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{total} = \sum x^2 - C \quad (6.3)$$

onde:

x = observação

$$C = \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (6.4)$$

n = número de observações

b) Fatores A, B e C

A soma de quadrados da componente linear do Fator A é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{A,l} = \frac{(a_3 - a_1)^2}{r \cdot a'' \cdot b' \cdot c'} \quad (6.5)$$

onde:

a_1 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível inferior

a_3 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível superior

r \equiv número de réplicas

$a'' = \sum c_j = (-1)^2 + (+1)^2 = 2$

b', c' \equiv número de níveis dos fatores b, c

A soma de quadrados da componente quadrática do Fator A é calculada pela seguinte expressão:

$$SQ_{A,q} = \frac{(a_1 - 2a_2 + a_3)^2}{r \cdot c'' \cdot a' \cdot b'} \quad (6.6)$$

onde:

a_1 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível inferior

a_2 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível intermediário

a_3 \equiv somatório das observações em que o fator A apresenta o nível superior

$c'' = \sum c_j = (-1)^2 + (-2)^2 + (+1)^2 = 6$

a', b' \equiv número de níveis dos fatores a, b

c) Interação entre os Fatores A, B e C

As somas de quadrados da componente linear das interações podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$SQ_{AB,l} = \frac{(a_3b_2 - a_1b_2 - a_3b_1 + a_1b_1)^2}{r \cdot (ab_1)'' \cdot c'} \quad (6.7)$$

onde:

a_3b_2 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível superior

a_1b_2 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível inferior

a_3b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível superior

a_1b_1 \equiv somatório das observações em que o fator B está presente e o fator A apresenta nível inferior

$$(ab_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$SQ_{AB,q} = \frac{(a_3b_2 - 2a_2b_2 + a_1b_2 - a_3b_1 + 2a_2b_1 + a_1b_1)^2}{r.(ab_q)'' . c'} \quad (6.8)$$

onde:

$$(ab_q)'' = \sum c_j = (-1.+1)^2 + (-1.-2)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.+1)^2 + (+1.-2)^2 + (+1.+1)^2 = 12$$

$$SQ_{AC,l} = \frac{(a_3c_2 - a_1c_2 - a_3c_1 + a_1c_1)^2}{r.(ac_1)'' . b'} \quad (6.9)$$

onde:

$a_3c_2 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível superior

$a_1c_2 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível inferior

$a_3c_1 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível superior

$a_1c_1 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator A apresenta nível inferior

$$(ac_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

$$SQ_{AC,q} = \frac{(a_3c_2 - 2a_2c_2 + a_1c_2 - a_3c_1 + 2a_2c_1 + a_1c_1)^2}{r.(ac_q)'' . b'} \quad (6.10)$$

onde:

$$(ac_q)'' = \sum c_j = (-1.+1)^2 + (-1.-2)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.+1)^2 + (+1.-2)^2 + (+1.+1)^2 = 12$$

$$SQ_{BC} = \frac{(b_2c_2 - b_1c_2 - b_2c_1 + b_1c_1)^2}{r.(bc_1)'' . a'} \quad (6.11)$$

onde:

$b_2c_2 \equiv$ somatório das observações em que os fatores B e C estão presentes

$b_1c_2 \equiv$ somatório das observações em que o fator B está presente e o fator C não

$b_2c_1 \equiv$ somatório das observações em que o fator C está presente e o fator B não

$b_1c_1 \equiv$ somatório das observações em que nem o fator B nem o fator C estão presentes

$$(bc_1)'' = \sum c_j = (-1.-1)^2 + (-1.+1)^2 + (+1.-1)^2 + (+1.+1)^2 = 4$$

d) Réplica

$$SQ = \frac{((\sum r_1) - (\sum r_2))^2}{r.a'.b'.c'} \quad (6.12)$$

onde:

$\sum r_1$ \equiv somatório das observações da réplica 1

$\sum r_2$ \equiv somatório das observações da réplica 2

r \equiv número de réplicas

a', b', c' \equiv número de níveis dos fatores a, b, c

Os resultados da análise de variância são apresentados em forma de tabelas (Tabelas 6.17 a 6.32), gráficos e equações.

TABELA 6.17 – Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaios de penetração

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	247	1	247	130,79*
SQ(A _{quadrática})	754	1	754	399,18*
SQ(B)	69	1	69	36,76*
SQ(C)	11	1	11	5,88
SQ(A B)	18	1	18	9,73*
SQ(AqB)	13	1	13	7,07
SQ(A C)	70	1	70	37,08*
SQ(AqC)	268	1	268	142,07*
SQ(BC)	44	1	44	23,53*
Réplica(l)	0	1	0	0,13
Réplica(q)	1	1	1	
Resíduo	43	23	2	
SQtotal	1541	35		

^aTeste F de Snedecor.

*Significância de 1%.

TABELA 6.18 – Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaios de ponto de amolecimento

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	396	1	396,09	316,88*
SQ(A _{quadrática})	4	1	3,78	3,03
SQ(B)	0	1	0,06	0,05
SQ(C)	14	1	14,06	11,25*
SQ(A B)	2	1	2,34	1,88
SQ(AqB)	11	1	11,28	9,03*
SQ(A C)	2	1	2,34	1,88
SQ(AqC)	14	1	13,78	11,03*
SQ(BC)	8	1	7,56	6,05
Réplica(l)	0	1	0,06	
Réplica(q)	8	1	7,56	
Resíduo	29	23	1,25	
SQtotal	488	35		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.19 – Resumo da análise de variância dos resultados dos ensaios de ponto de fulgor

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	2904	1	2904	129,57*
SQ(A _{quadrática})	1625	1	1625	72,48*
SQ(B)	9	1	9	0,40
SQ(C)	9	1	9	0,40
SQ(A B)	2	1	2	0,07
SQ(AqB)	1458	1	1458	65,05*
SQ(A C)	150	1	150	6,69
SQ(AqC)	41	1	41	1,81
SQ(BC)	9	1	9	0,40
Réplica (l)	1	1	1	
Réplica (q)	1	1	1	
Resíduo	516	23	22	
SQtotal	6723	35		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.20 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: G^* (Pa)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	113683575	1	113683575	363,98*
SQ(A _{quadrática})	2168775	1	2168775	6,94
SQ(B)	63551	1	63551	0,20
SQ(C)	2245428	1	2245428	7,19
SQ(A B)	418933	1	418933	1,34
SQ(AqB)	65343	1	65343	0,21
SQ(A C)	3382841	1	3382841	10,83*
SQ(AqC)	1560605	1	1560605	5,00
SQ(BC)	2544759	1	2544759	8,15
Réplica	406901	1	406901	
Resíduo	4060349	13	312335	
SQtotal	130601060	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.21 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: δ (graus)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	1086	1	1086	2003,78*
SQ(A _{quadrática})	16	1	16	28,66*
SQ(B)	5	1	5	8,66
SQ(C)	5	1	5	8,99
SQ(A B)	1	1	1	2,21
SQ(AqB)	8	1	8	14,95*
SQ(A C)	14	1	14	26,30*
SQ(AqC)	7	1	7	13,19*
SQ(BC)	1	1	1	2,70
Réplica	0	1	0	
Resíduo	7	13	1	
SQtotal	1150	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.22 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR antes do envelhecimento no RTFOT: $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	140	1	140	403,26*
SQ(A _{quadrática})	3	1	3	9,22*
SQ(B)	0	1	0	0,20
SQ(C)	3	1	3	9,06
SQ(A B)	0	1	0	1,41
SQ(AqB)	0	1	0	0,35
SQ(A C)	5	1	5	13,74*
SQ(AqC)	2	1	2	6,10
SQ(BC)	3	1	3	8,03
Réplica	0	1	0	
Resíduo	5	13	0	
SQtotal	162	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.23 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: G^* (Pa)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	160579584	1	160579584	186,11*
SQ(A _{quadrática})	533830	1	533830	0,62
SQ(B)	99202	1	99202	0,11
SQ(C)	15477022	1	15477022	17,94*
SQ(A B)	1985281	1	1985281	2,30
SQ(AqB)	164502	1	164502	0,19
SQ(A C)	11943936	1	11943936	13,84*
SQ(AqC)	404434	1	404434	0,47
SQ(BC)	2066827	1	2066827	2,40
Réplica	187090	1	187090	
Resíduo	11216379	13	862798	
SQtotal	204658087	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.24 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: δ (graus)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	1172	1	1172	849,01*
SQ(A _{quadrática})	0	1	0	0,02
SQ(B)	6	1	6	4,23
SQ(C)	17	1	17	12,61*
SQ(A B)	1	1	1	0,71
SQ(AqB)	1	1	1	0,97
SQ(A C)	33	1	33	24,16*
SQ(AqC)	20	1	20	14,82*
SQ(BC)	1	1	1	0,86
Réplica	0	1	0	
Resíduo	18	13	1	
SQtotal	1271	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.25 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de curto prazo: G*/sen δ

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	217	1	217	228,02*
SQ(A _{quadrática})	1	1	1	1,43
SQ(B)	0	1	0	0,01
SQ(C)	16	1	16	16,78*
SQ(A B)	3	1	3	3,33
SQ(AqB)	1	1	1	0,64
SQ(A C)	15	1	15	15,81*
SQ(AqC)	1	1	1	1,53
SQ(BC)	2	1	2	2,44
Réplica	0	1	0	
Resíduo	12	13	1	
SQtotal	269	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.26 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: G*

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	14120685062500	1	14120685062500	245,59*
SQ(A _{quadrática})	1508397520833	1	1508397520833	26,23*
SQ(B)	393728166667	1	393728166667	6,85
SQ(C)	277350000000	1	277350000000	4,82
SQ(AIB)	450576562500	1	450576562500	7,84
SQ(AqB)	238520833	1	238520833	0,00
SQ(AIC)	2788065062500	1	2788065062500	48,49*
SQ(AqC)	1427265187500	1	1427265187500	24,82*
SQ(BC)	143221500000	1	143221500000	2,49
Réplica	112666667	1	112666667	
Resíduo	747469083333	13	57497621795	
SQtotal	21857109333333	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.27 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: δ (graus)

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	79	1	79	108,66*
SQ(A _{quadrática})	0	1	0	0,01
SQ(B)	0	1	0	0,21
SQ(C)	8	1	8	11,67*
SQ(AIB)	1	1	1	0,79
SQ(AqB)	1	1	1	0,75
SQ(AIC)	6	1	6	7,69
SQ(AqC)	0	1	0	0,23
SQ(BC)	10	1	10	14,08*
Réplica	2	1	2	
Resíduo	9	13	1	
SQtotal	116	23		

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.28 – Resumo da análise de variância dos resultados do DSR após envelhecimento de longo prazo: $G^* \text{sen } \delta$

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	12886305	1	12886305	259,37*
SQ(A _{quadrática})	88838	1	88838	1,79
SQ(B)	60200	1	60200	1,21
SQ(C)	877838	1	877838	17,67*
SQ(AIB)	264453	1	264453	5,32
SQ(AqB)	171244	1	171244	3,45
SQ(AIC)	1176683	1	1176683	23,68*
SQ(AqC)	356558	1	356558	7,18
SQ(BC)	190104	1	190104	3,83
Réplica	122	1	122	
Resíduo	645888	13	49684	
SQtotal	16718231	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.29 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios de viscosidade aparente (Brookfield) – 175°C

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	1759604	1	1759604	1045,40*
SQ(A _{quadrática})	66533	1	66533	39,53*
SQ(B)	40993	1	40993	24,35*
SQ(C)	265740	1	265740	157,88*
SQ(AIB)	163565	1	163565	97,18*
SQ(AqB)	171766	1	171766	102,05*
SQ(AIC)	229028	1	229028	136,07*
SQ(AqC)	12020	1	12020	7,14
SQ(BC)	71164	1	71164	42,28*
Réplica(l)	265	1	265	
Réplica(q)	0	1	0	
Resíduo	38713	23	1683	
SQtotal	2819393	35		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.30 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios de viscosidade aparente (Brookfield) – 135°C

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	57958916	1	57958916	1233,59*
SQ(A _{quadrática})	3136803	1	3136803	66,76*
SQ(B)	9203	1	9203	0,20
SQ(C)	7511619	1	7511619	159,88*
SQ(A B)	122651	1	122651	2,61
SQ(AqB)	410977	1	410977	8,75*
SQ(A C)	8489105	1	8489105	180,68*
SQ(AqC)	1547891	1	1547891	32,95*
SQ(BC)	2340390	1	2340390	49,81*
Réplica(l)	0	1	0	
Réplica(q)	20986	1	20986	
Resíduo	1080632	23	46984	
SQtotal	82629173	35		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.31 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios do BBR – valores de S

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ^a
SQ(A _{linear})	4858	1	4858	1005,49*
SQ(A _{quadrática})	52	1	52	10,69*
SQ(B)	39	1	39	7,97
SQ(C)	141	1	141	29,21*
SQ(A B)	70	1	70	14,43*
SQ(AqB)	62	1	62	12,76*
SQ(A C)	0	1	0	0,03
SQ(AqC)	162	1	162	33,54*
SQ(BC)	100	1	100	20,71*
Réplica	0	1	0	
Resíduo	63	13	5	
SQtotal	5546	23		

^aTeste *F de Snedecor*.

*Significância de 1%.

TABELA 6.32 – Resumo da análise de variância dos resultados do ensaios do BBR – valores de m

Fatores e Interações	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F^a
SQ(A _{linear})	0,03	1	0,03	46,93*
SQ(A _{quadrática})	0,05	1	0,05	62,24*
SQ(B)	0,01	1	0,01	7,00
SQ(C)	0,00	1	0,00	1,83
SQ(A B)	0,00	1	0,00	0,27
SQ(AqB)	0,00	1	0,00	0,62
SQ(A C)	0,00	1	0,00	0,09
SQ(AqC)	0,01	1	0,01	8,24
SQ(BC)	0,00	1	0,00	0,01
Réplica	0,00	1	0,00	
Resíduo	0,01	13	0,00	
SQtotal	0,10	23	0,00	

^aTeste *F* de *Snedecor*.

*Significância de 1%.

6.3.3 – ANÁLISE DE REGRESSÃO

A análise de variância de um experimento fatorial permite não só a identificação de fatores significativos, mas também o desenvolvimento de modelos de regressão, que relacionam quantitativamente os fatores significativos (variáveis independentes x_i) com a resposta do sistema (variável dependente Y).

Com base na soma de quadrados (SQ) de cada fator ou interação, pode-se quantificar a contribuição de cada termo e também obter seus efeitos de ordem $n-1$, onde n é o número de níveis do fator em questão. Por exemplo, fatores com três níveis podem contribuir com até dois termos para a equação de regressão, um linear e outro quadrático. Um modelo de regressão múltipla é apresentado em seguida:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_{B,l}.P_1(B) + \alpha_{B,q}.P_q(B) + \alpha_P.P_1(P) + \alpha_T.P_1(T) + \alpha_{BP,l}.P_1(B).P_1(P) + \alpha_{BP,q}.P_q(B).P_1(P) + \alpha_{BT,l}.P_1(B).P_1(T) + \alpha_{BT,q}.P_q(B).P_1(T) + \alpha_{BT}.P_1(P).P_1(T) \quad (6.13)$$

onde:

Y = variável dependente

B, P, T = fatores considerados, respectivamente, Teor de Borracha, Tamanho das Partículas e Temperatura da Mistura;

$$\alpha_0 = \Sigma X / n$$

ΣX = somatório de todas as observações

n = número de observações

$\alpha_{B,l}$ = coeficiente correspondente ao fator B, termo linear

$\alpha_{B,q}$ = coeficiente correspondente ao fator B, termo quadrático

α_P = coeficiente correspondente ao fator P

α_T = coeficiente correspondente ao fator T

$\alpha_{BP,l}$ = coeficiente correspondente à interação BP_1

$\alpha_{BP,q}$ = coeficiente correspondente à interação BP_q

$\alpha_{BT,l}$ = coeficiente correspondente à interação BT_1

$\alpha_{BT,q}$ = coeficiente correspondente à interação BT_q

α_{BT} = coeficiente correspondente à interação BT

$P_1(B)$ = equação polinomial linear do fator teor de borracha, B (em %):

$$P_1(B) = \frac{B - 12}{6}$$

$P_q(B)$ = equação polinomial quadrática do fator teor de borracha, B (em %):

$$P_q(B) = 3x \left[\frac{(B - 12)^2}{6} - \frac{2}{3} \right]$$

$P(P)$ = equação polinomial do fator tamanho das partículas, P (-1 for # 50, +1 for # 40);

$$P(P) = \pm 1$$

$P(T)$ = equação polinomial do fator temperatura de mistura, T (°C)

$$P(T) = \frac{T - 165}{5}$$

A constante α_0 é o valor médio, ou seja, a somatória dos resultados de todos os ensaios realizados divididos pelo número de resultados de ensaios (igual ao número de combinações de cada fator vezes o número de réplicas).

Considerando-se:

$$P_1(B) = B_1$$

$$P_q(B) = B_q$$

$$P(P) = P$$

$$P(T) = T$$

e substituindo na equação geral (6.13), tem-se:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_{B,l}B_1 + \alpha_{B,q}B_q + \alpha_P P + \alpha_C T + \alpha_{BP,l}B_1P + \alpha_{BP,q}B_qP + \alpha_{BT,l}B_1T + \alpha_{BT,q}B_qT + \alpha_{TC}PT \quad (6.14)$$

A partir das somas de quadrados dos fatores e interações significativos é possível também, calcular o coeficiente de determinação (R^2) do modelo utilizando-se a seguinte expressão:

$$R^2 = \frac{SQ_{\text{modelo}}}{SQ_{\text{total}}} = \frac{\sum SQ_i}{SQ_{\text{total}}} \quad (6.15)$$

onde: SQ_i = soma de quadrados dos fatores presentes na equação de regressão

Os modelos estatísticos obtidos, que representam os efeitos dos fatores (teor e tamanho das partículas de borracha e temperatura de mistura) sobre o comportamento das misturas asfalto-borracha com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), são apresentados a seguir:

a) Penetração (1/10 mm)

$$Y = 44,6 + 3,2B_1 - 3,2B_q - 1,4P - 0,6B_1P + 1,7B_1T + 1,9B_qT + 1,1PT$$

$$R^2 = 0,96$$

b) Ponto de Amolecimento (°C)

$$Y = 58,0 + 4,1B_1 - 0,6T + 0,4B_qP - 0,4B_qT$$

$$R^2 = 0,89$$

c) Ponto de Fulgor (°C)

$$Y = 292,5 + 11,0B_1 - 4,8B_q + 4,5B_qP$$

$$R^2 = 0,89$$

d) Módulo de Cisalhamento Complexo, G* (Pa), antes do envelhecimento

$$Y = 5176,4 + 2665,6B_1 - 459,8B_1T$$

$$R^2 = 0,90$$

e) Ângulo de Fase, d (graus), antes do envelhecimento

$$Y = 76,5 - 8,2B_1 + 0,6B_q + 0,4B_qP + 0,9B_1T + 0,4B_qT$$

$$R^2 = 0,98$$

f) G*/sen d (kPa), antes do envelhecimento

$$Y = 5,4 + 3,0B_1 + 0,3B_q - 0,6B_1T$$

$$R^2 = 0,92$$

g) Módulo de Cisalhamento Complexo, G* (Pa), após envelhecimento de curto prazo

$$Y = 7306,3 + 3168,0B_1 + 803,0T - 864,0B_1T$$

$$R^2 = 0,92$$

h) Ângulo de Fase, d (graus), após envelhecimento de curto prazo

$$Y = 73,4 - 8,6B_1 - 0,9T + 1,4B_1T + 0,7B_qT$$

$$R^2 = 0,98$$

i) G*/sen d (kPa), após envelhecimento de curto prazo

$$Y = 7,8 + 3,7B_1 + 0,8T - 1,0B_1T$$

$$R^2 = 0,92$$

j) Módulo de Cisalhamento Complexo, G^* (Pa), após envelhecimento de longo prazo

$$Y = 2175070,8 - 1153831,3B_1 + 112472,9B_q + 204418,8B_1P + 446331,2B_1T + \\ - 169472,9B_qT$$

$$R^2 = 0,96$$

k) Ângulo de Fase, d (graus), após envelhecimento de longo prazo

$$Y = 49,5 - 2,7B_1 + 0,5PT$$

$$R^2 = 0,90$$

l) $G^* \text{sen } d$ (kPa), após envelhecimento de longo prazo

$$Y = 1680,0 - 940,4B_1 + 93,3B_q + 167,1B_1P + 315,5B_1T - 124,0B_qT$$

$$R^2 = 0,96$$

m) Viscosidade Brookfield (cP) – 175°C

$$Y = 367,2 + 270,8B_1 + 30,4B_q - 33,7P - 85,9T - 82,6B_1P - 48,8B_qP + \\ - 97,7B_1T - 44,5PT$$

$$R^2 = 0,98$$

n) Viscosidade Brookfield (cP) – 135°C

$$Y = 2279,7 + 1554,0B_1 + 208,7B_q - 456,8T - 75,6B_qP - 594,7B_1T + \\ - 146,6 B_qT - 255,0PT$$

$$R^2 = 0,99$$

o) Rigidez à Fluência na Flexão – S

$$Y = 33,2 - 17,4B_1 + 1,0B_q - 2,4T - 2,1B_1P + 1,1B_qP - 1,8B_qT + 2,0PT$$

$$R^2 = 0,98$$

p) Rigidez à Fluência na Flexão – valor de m

$$Y = 0,4 - 0,05B_1 - 0,03B_q$$

$$R^2 = 0,78$$

6.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.4.1 - EFEITOS DOS PARÂMETROS NAS PROPRIEDADES DOS ASFALTO-BORRACHA

a) Ponto de Amolecimento

As Figuras 6.17 a 6.20, obtidas dos modelos estatísticos desenvolvidos no item 6.3, apresentam os efeitos do teor de borracha, da temperatura de mistura e da granulometria da borracha sobre o ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha.

Os gráficos procuram ilustrar os efeitos dos fatores significativos na análise estatística. As linhas tracejadas representam o prolongamento das funções estatísticas, desenvolvidas com os teores de 6, 12 e 18%, até os pontos utilizados para controle, correspondentes a resultados efetivamente obtidos nos ensaios (teores de borracha de 0 e 24%).

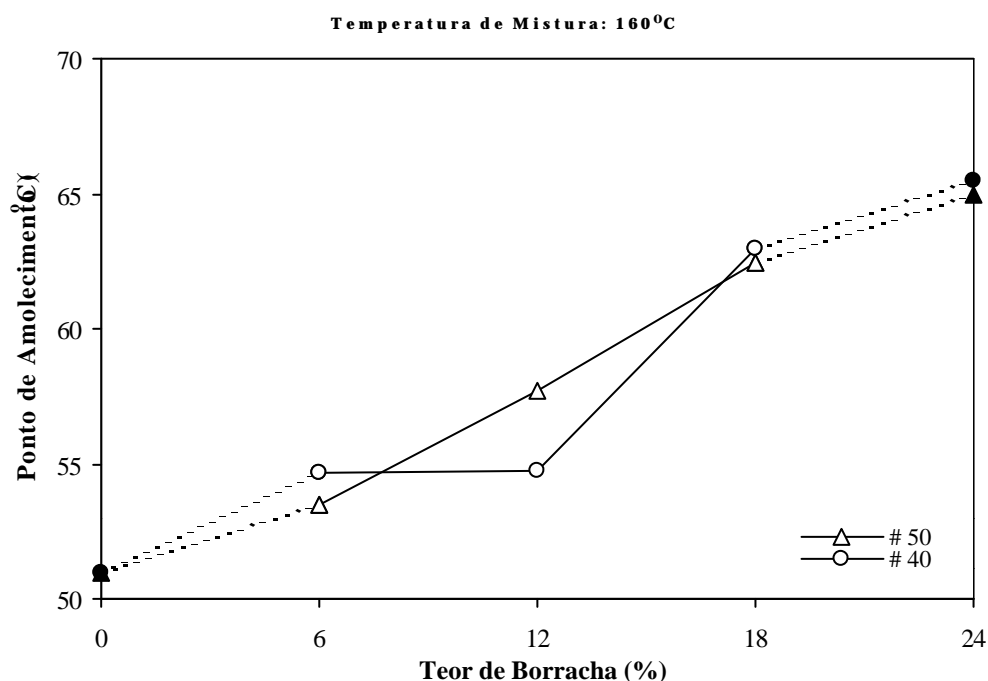


FIGURA 6.17 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

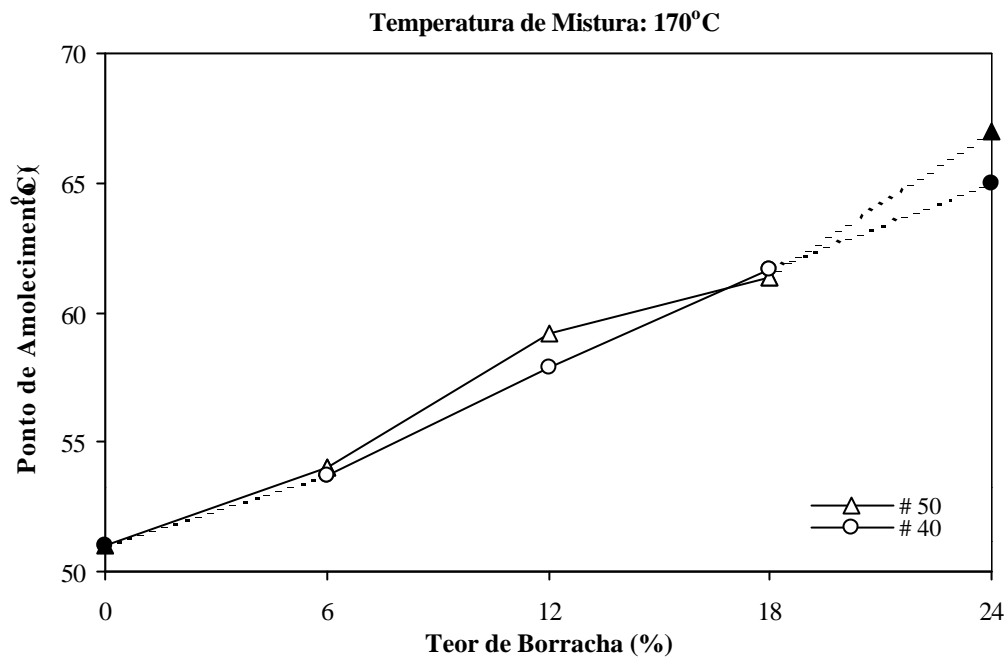


FIGURA 6.18 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

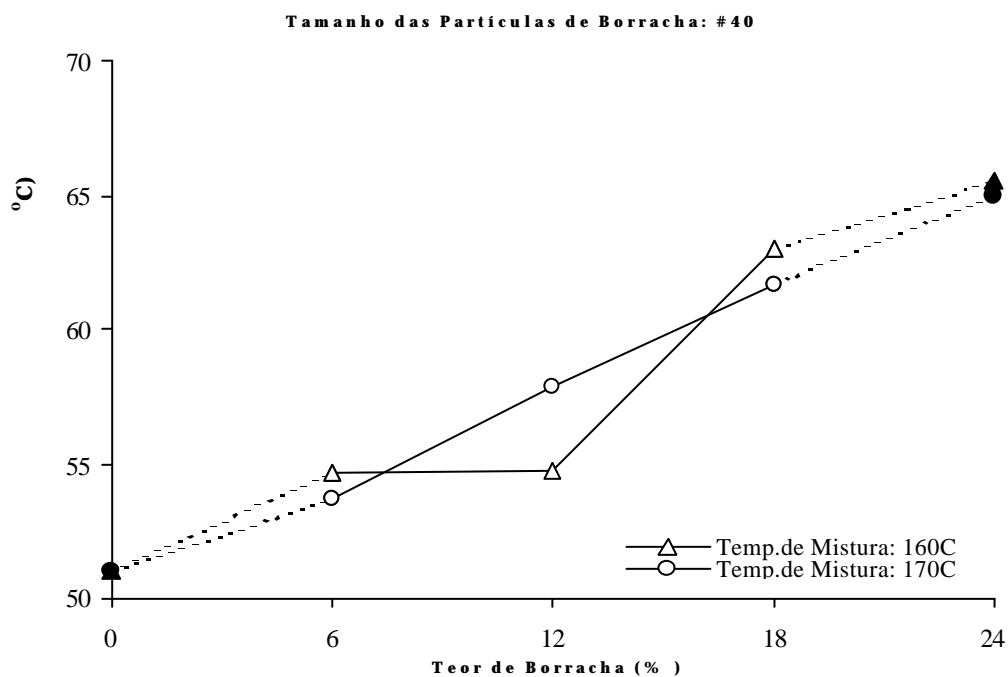


FIGURA 6.19 - Efeito do teor e da granulometria da borracha no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

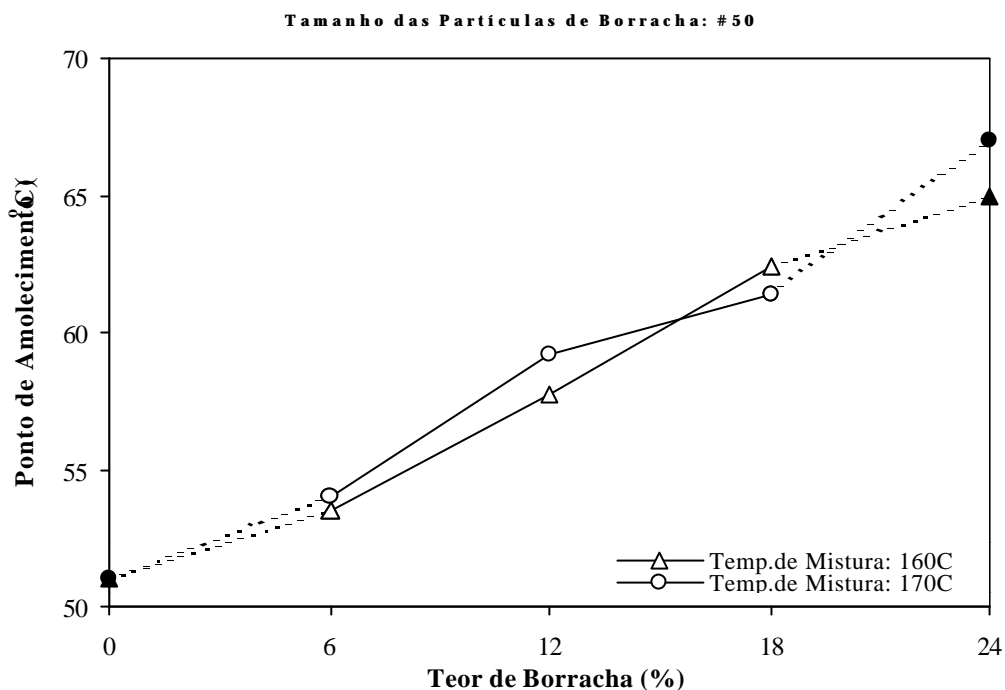


FIGURA 6.20 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura no ponto de amolecimento do ligante asfalto-borracha

O ponto de amolecimento é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha.

Não há uma tendência definida sobre os efeitos da temperatura de mistura e do tamanho das partículas. Ou seja, o entrecruzamento das curvas mostra que os efeitos do aumento da temperatura de mistura ou da diminuição do tamanho das partículas não são os mesmos para todos os teores de borracha.

b) Ponto de Fulgor

A Figura 6.21 apresenta os efeitos do teor de borracha, da temperatura de mistura e da granulometria da borracha sobre o ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha.

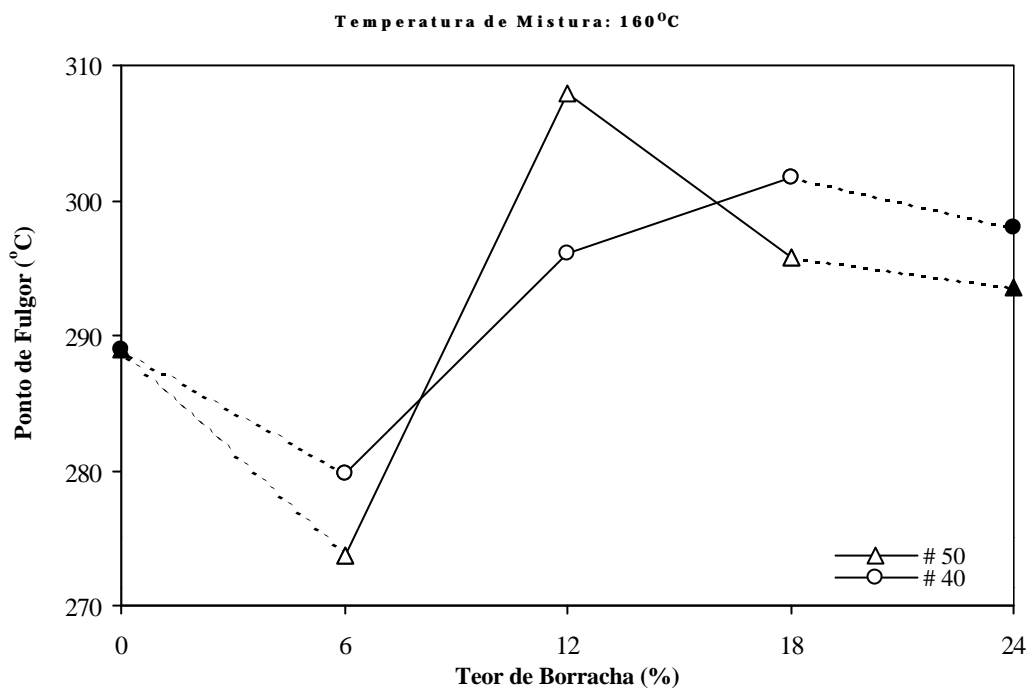


FIGURA 6.21 - Efeito do teor de borracha no ponto de fulgor do ligante asfalto-borracha

Observa-se um comportamento oscilante sem um efeito característico dos fatores, podendo-se no máximo admitir que há um aumento do ponto de fulgor em função do teor de borracha. A razão mais provável para a enorme dispersão nos resultados é a película que se formava na superfície do asfalto-borracha durante a realização do ensaio.

c) Penetração

O comportamento previsto é que a adição de borracha torna o ligante mais viscoso, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento do teor de borracha nas misturas. Os resultados obtidos, no entanto, mostram que a penetração aumenta até um teor de 12%, estabilizando ou diminuindo para os teores de 18 e 24 % de borracha. Resultados semelhantes já haviam sido obtidos por outros pesquisadores, como HEIZTMAN (1992b).

As Figuras 6.22 a 6.25 apresentam os efeitos dos fatores sobre a penetração do ligante asfalto-borracha.

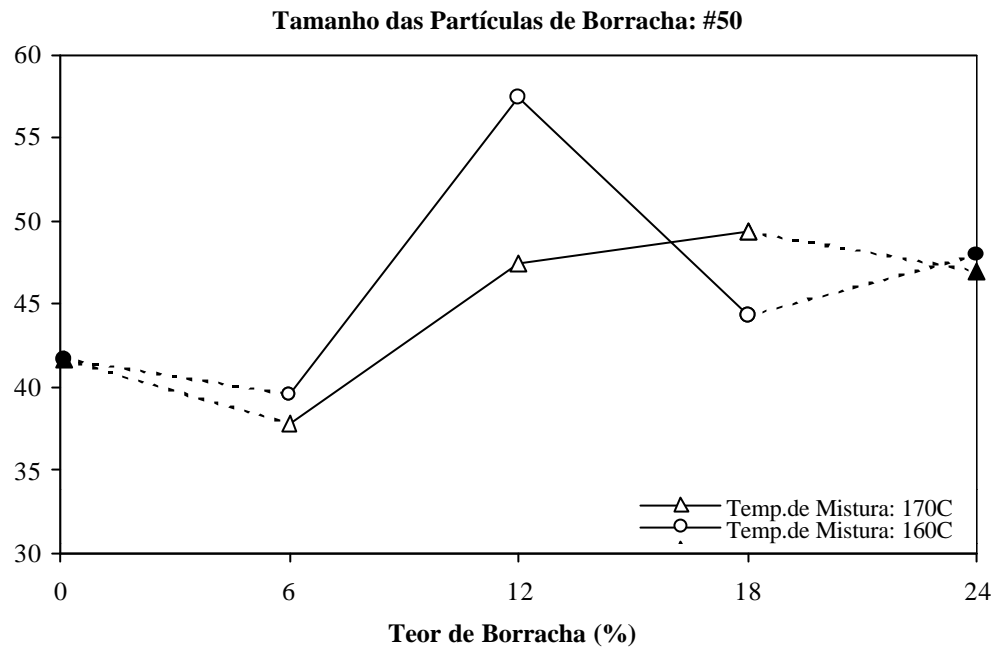


FIGURA 6.22 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha

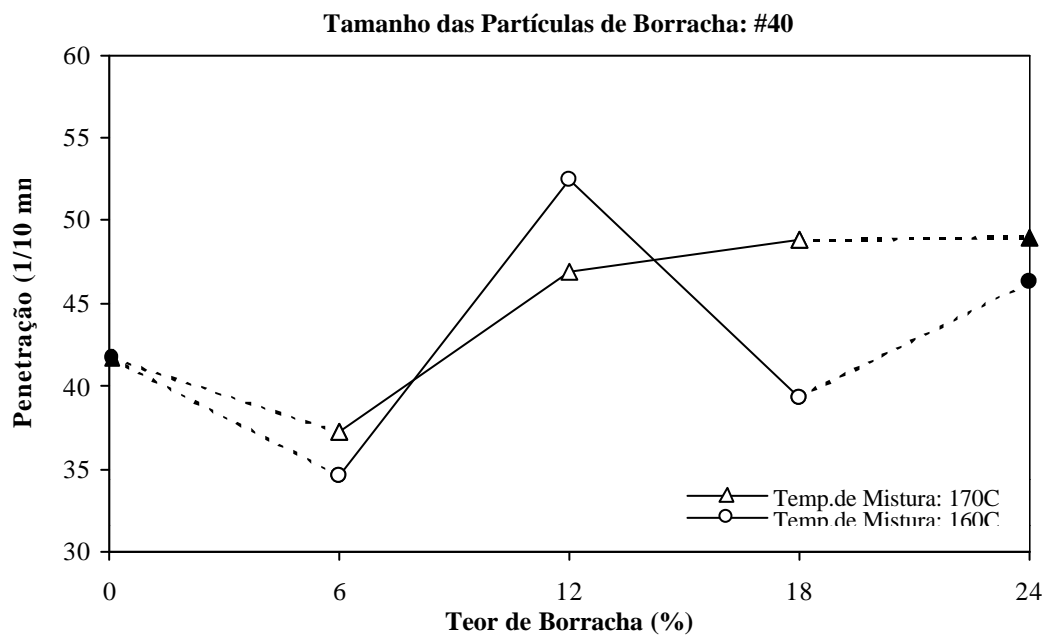


FIGURA 6.23 - Efeito do teor de borracha e da temperatura de mistura na penetração do ligante asfalto-borracha

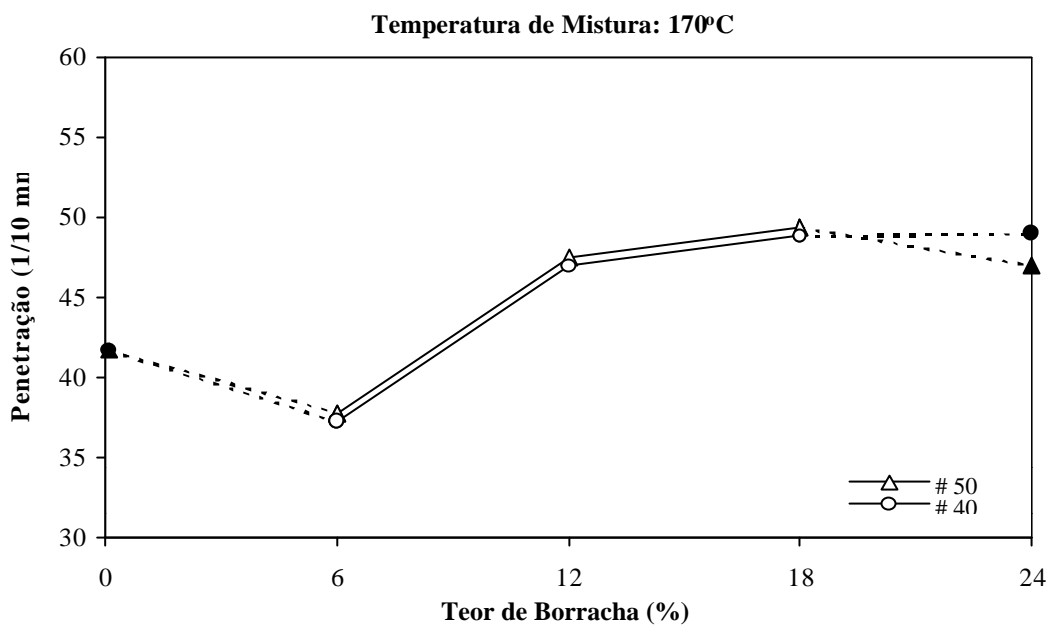


FIGURA 6.24 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha

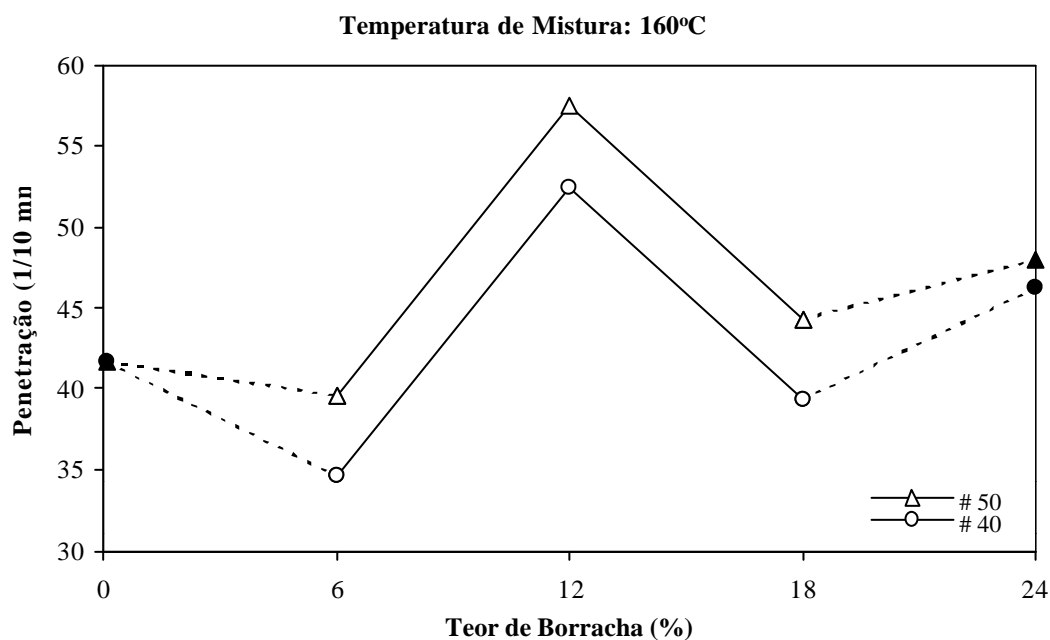


FIGURA 6.25 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na penetração do ligante asfalto-borracha

Observa-se que a mistura com borracha mais grossa (#40) tende a apresentar menor penetração (Figuras 6.24 e 6.25). O efeito da temperatura de mistura (Figuras 6.22 e 6.23), por outro lado, não é constante com o aumento do teor de borracha.

d) Viscosidade Brookfield

As Figuras 6.26 a 6.29 apresentam os efeitos dos fatores sobre a viscosidade Brookfield a 175°C, enquanto as Figuras 6.30 a 6.34 apresentam a viscosidade Brookfield a 135°C. A viscosidade aparente, a 175°C, aumenta com o teor de borracha. A temperatura de mistura de 160°C resulta em maior viscosidade, enquanto o efeito da granulometria não é constante para todos os teores de borracha.

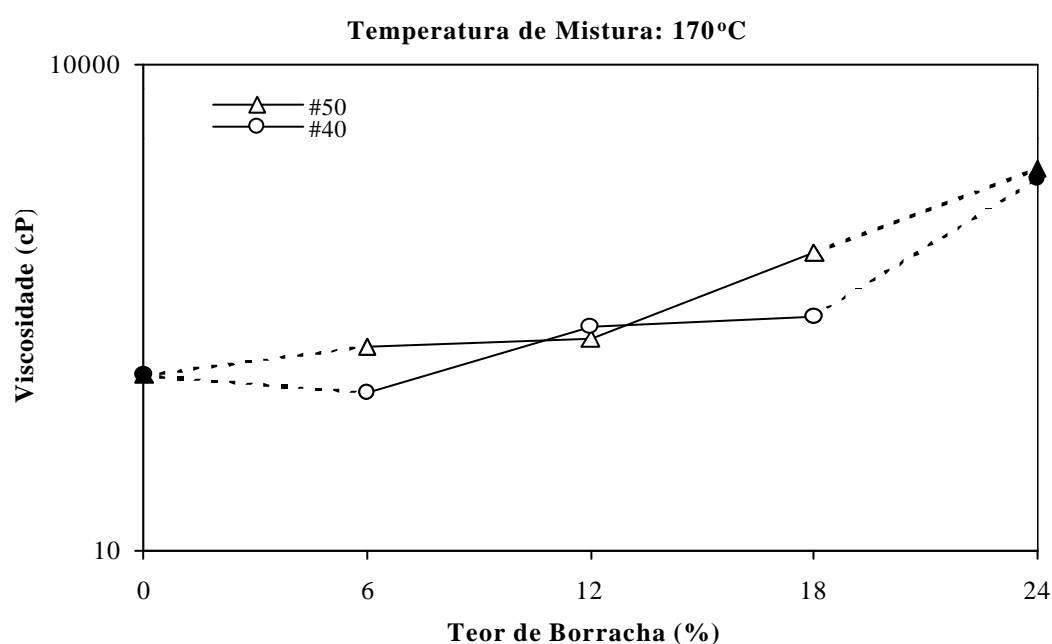


FIGURA 6.26 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

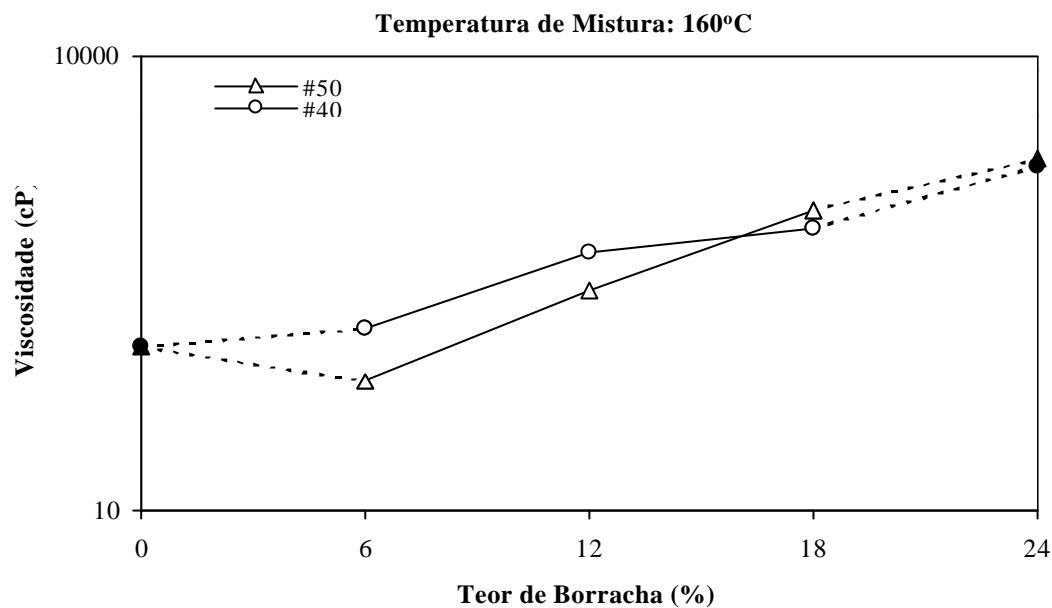


FIGURA 6.27 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

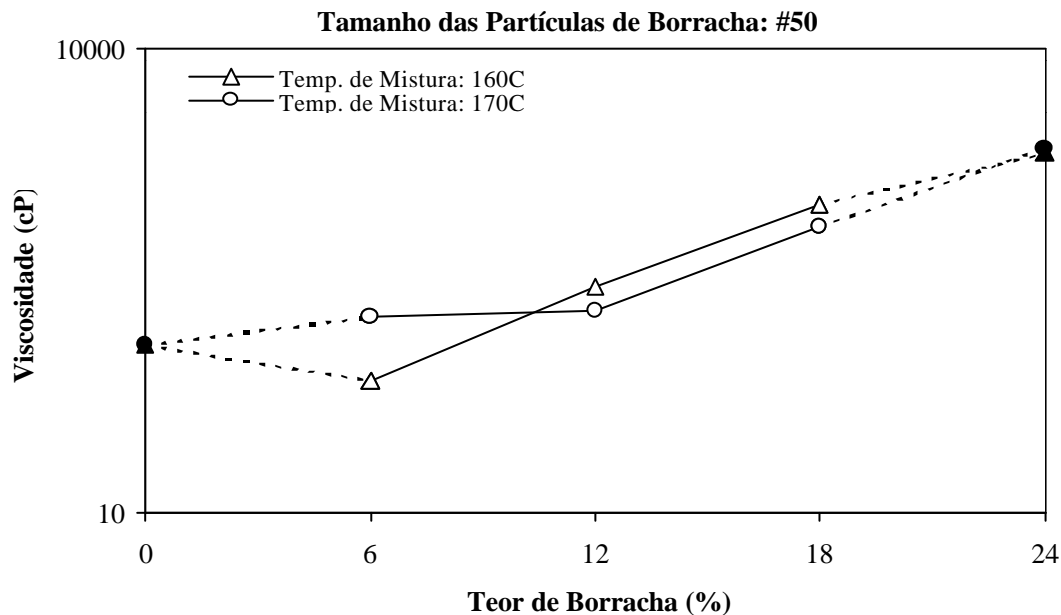


FIGURA 6.28 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

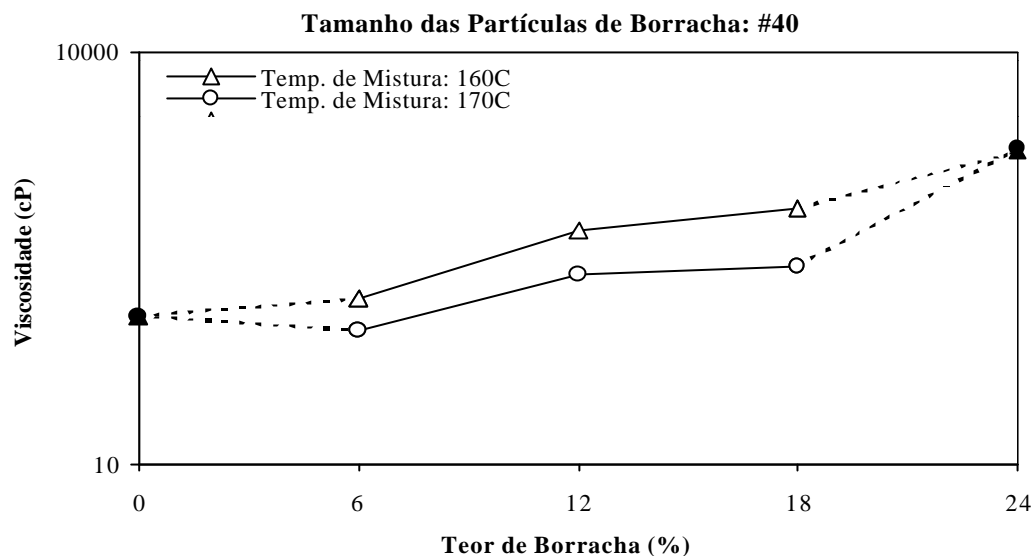


FIGURA 6.29 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 175°C

Há um aumento, esperado, da viscosidade com o teor de borracha. A viscosidade, para os teores de 6 e 12%, é maior para temperatura de mistura de 160°C (Figuras 6.27 e 6.29). Para partículas com maior tamanho (#40), a viscosidade é maior quando a temperatura de mistura é menor (Figuras 6.27 e 6.29).

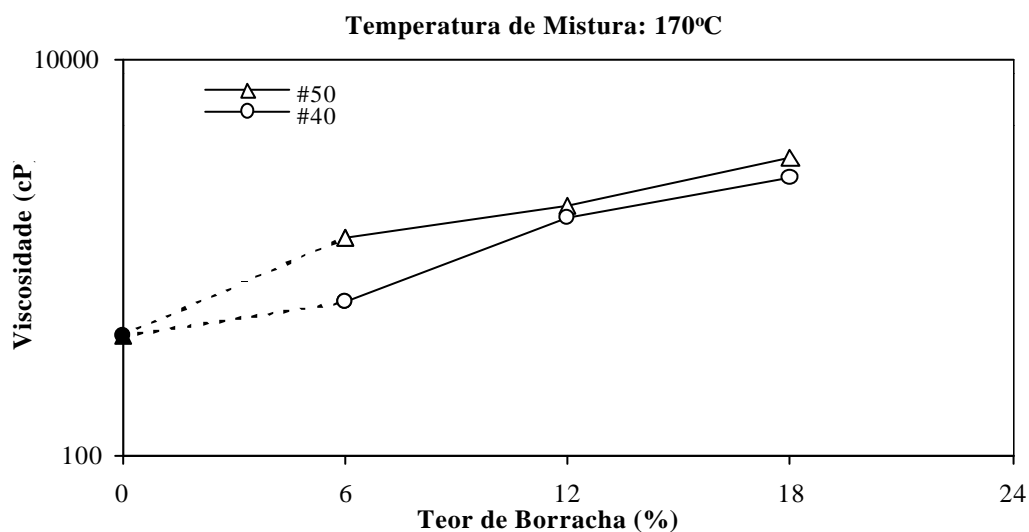


FIGURA 6.30 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

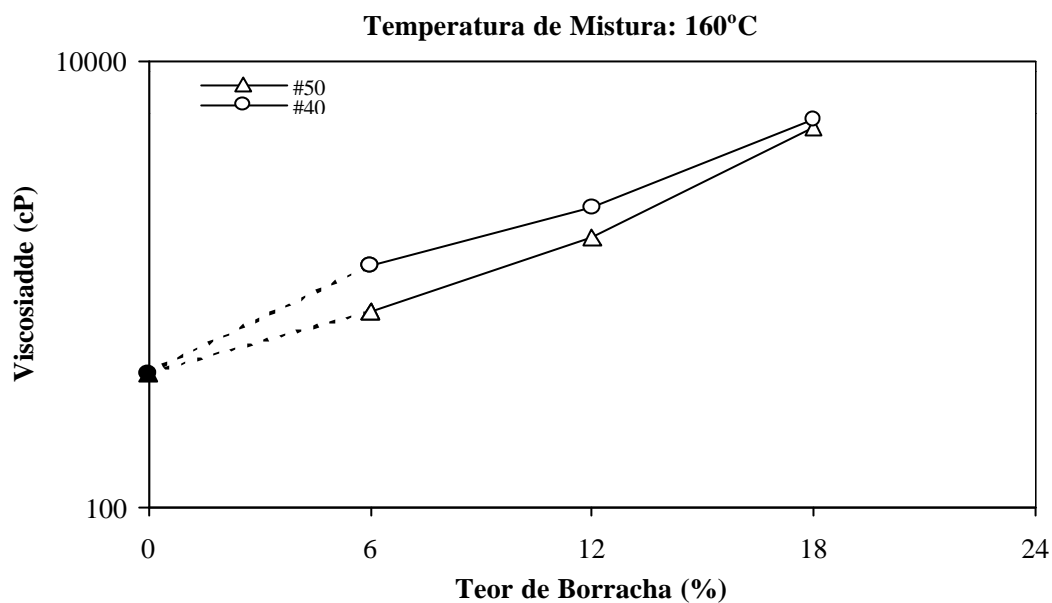


FIGURA 6.31 - Efeito do teor e da granulometria da borracha na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

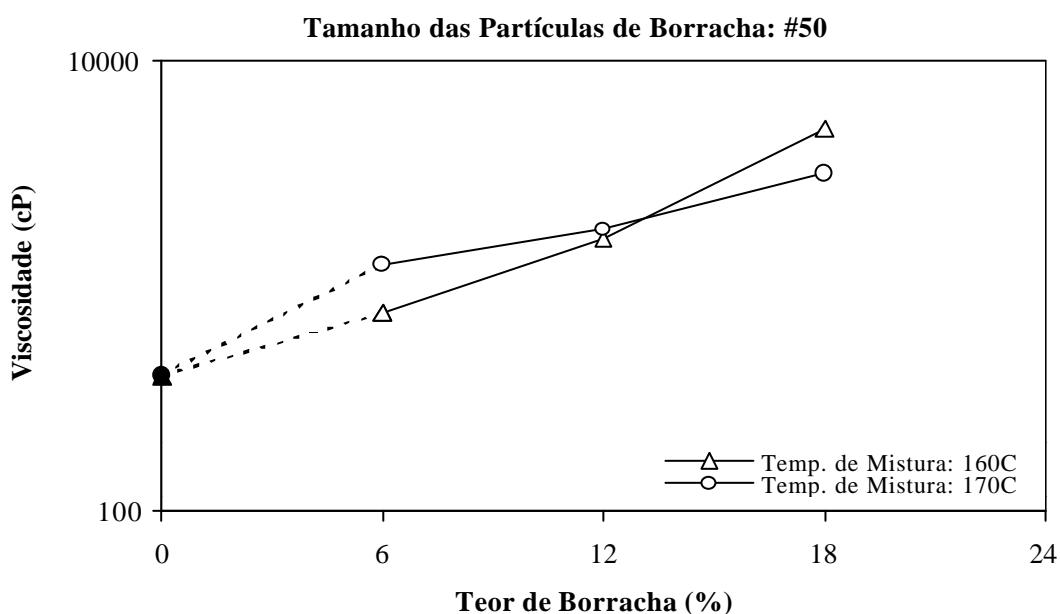


FIGURA 6.32 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

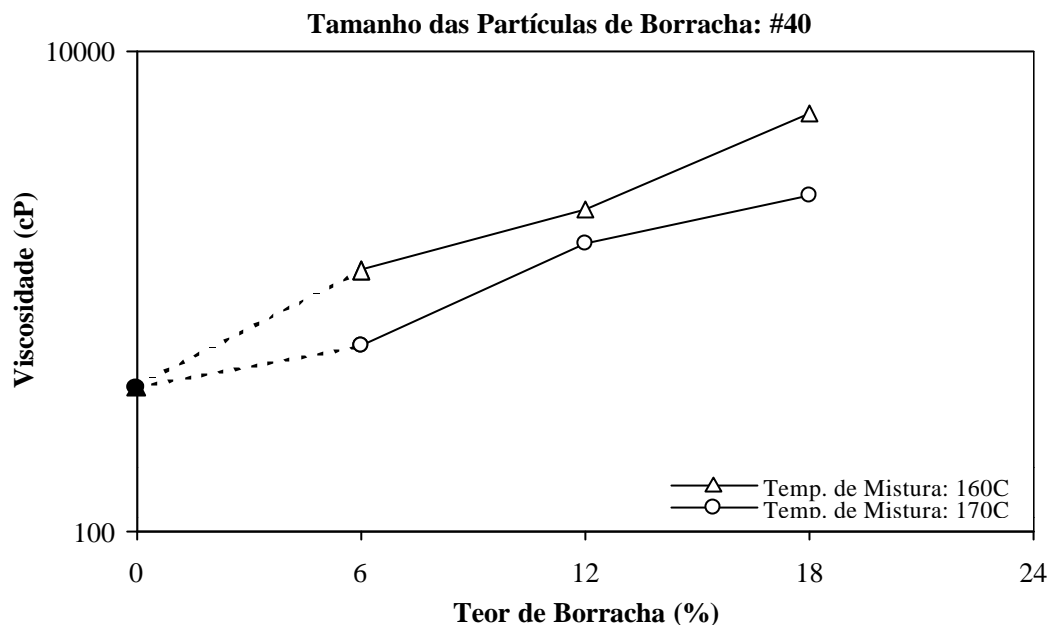


FIGURA 6.33 - Efeito do teor e da temperatura de mistura na viscosidade (Brookfield) das misturas asfalto-borracha – Temperatura de ensaio: 135°C

Há um aumento da viscosidade com o teor de borracha, sendo que o ligante asfalto-borracha produzido a uma temperatura de mistura de 170°C com partículas de borracha menores (#50) é mais viscoso (Figura 6.30), ocorrendo o inverso com o ligante produzido a uma temperatura de 160°C, em que a viscosidade é maior para as partículas de borracha maiores (Figura 6.31).

e) Cisalhamento Dinâmico antes do Envelhecimento

Os resultados do reômetro de cisalhamento dinâmico para amostras não envelhecidas, apresentados nas Figuras 6.6 a 6.8, mostram que a resistência ao acúmulo de deformação permanente aumenta em função do teor de borracha. Há um aumento do módulo de cisalhamento complexo, G^* (Figura 6.34), e uma redução do ângulo de fase, δ , com o aumento do teor de borracha (Figuras 6.35 a 6.38), mas não há um efeito característico dos fatores temperatura de mistura e tamanho das partículas de borracha.

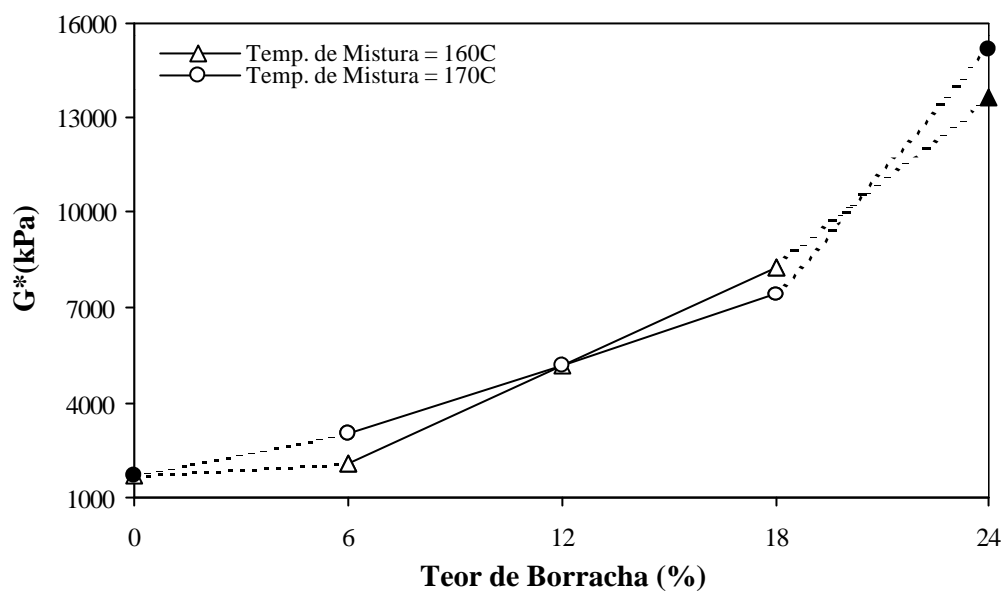


FIGURA 6.34 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

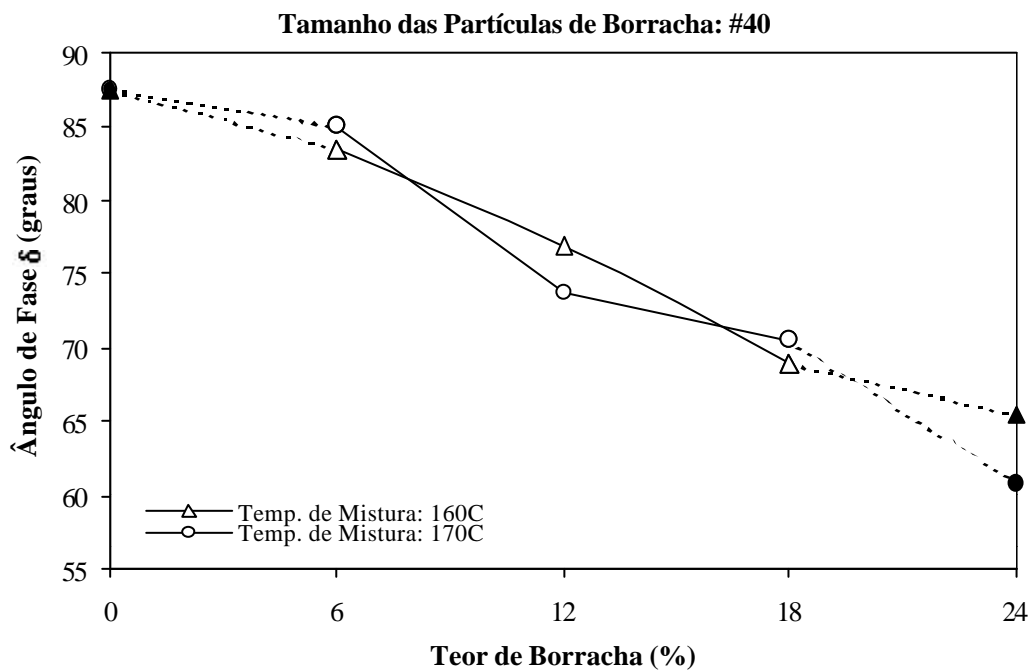


FIGURA 6.35 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

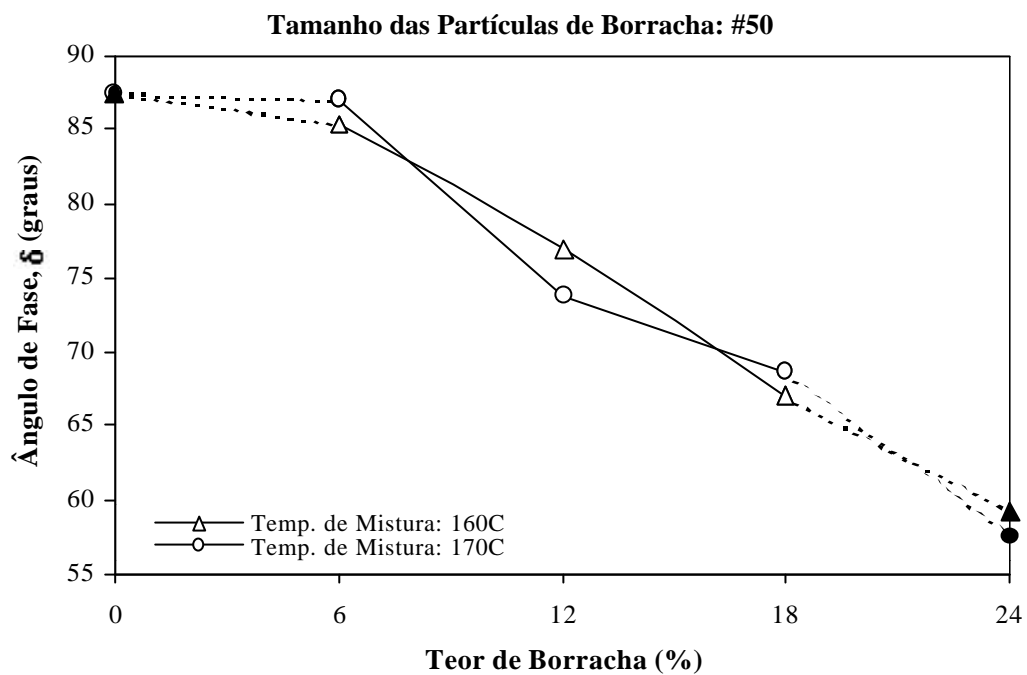


FIGURA 6.36 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

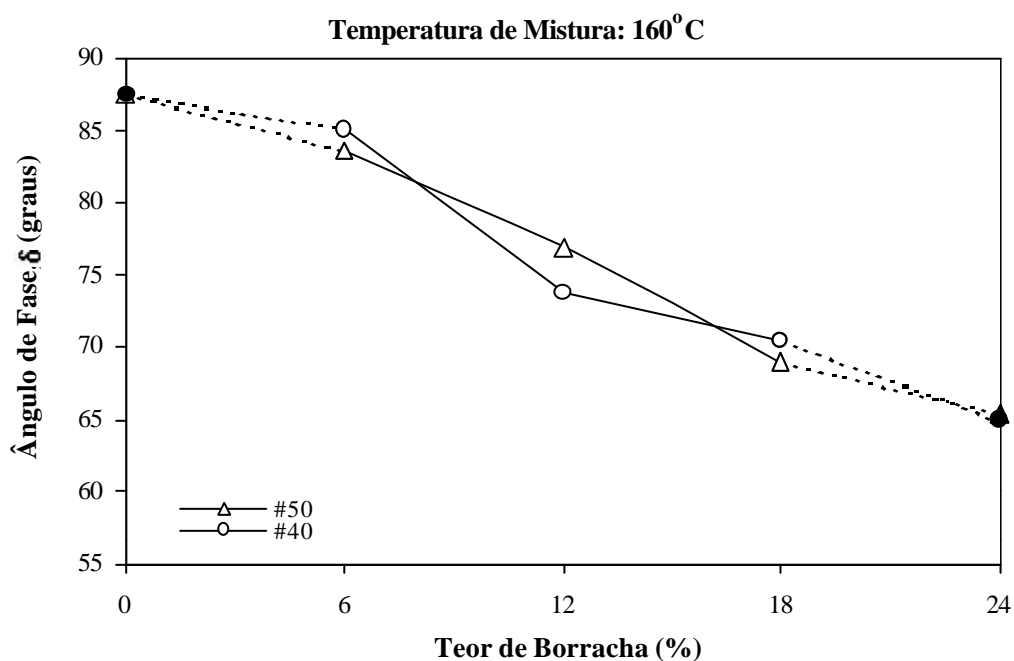


FIGURA 6.37 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

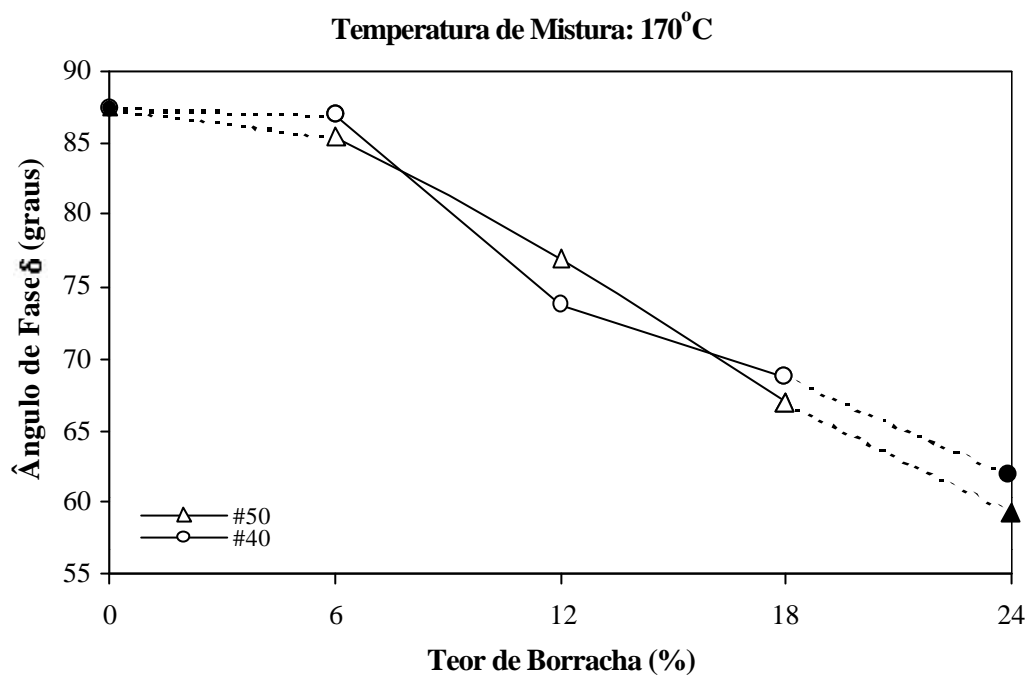


FIGURA 6.38 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

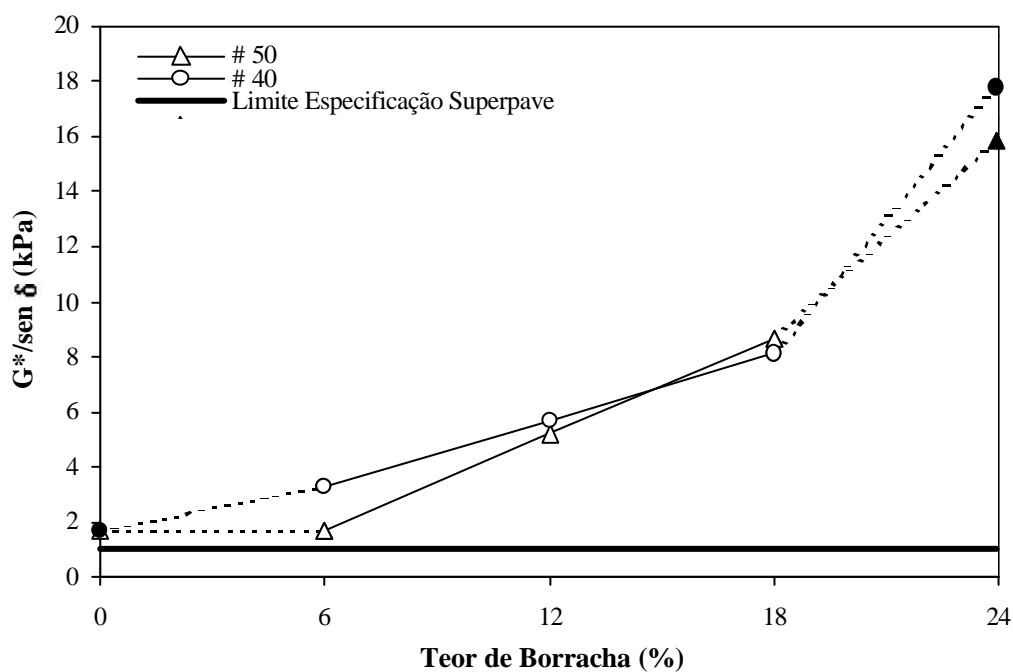


FIGURA 6.39 - Efeito do teor de borracha na resistência à deformação permanente do ligante asfalto-borracha antes do envelhecimento

f) Cisalhamento Dinâmico após Envelhecimento de Curto Prazo

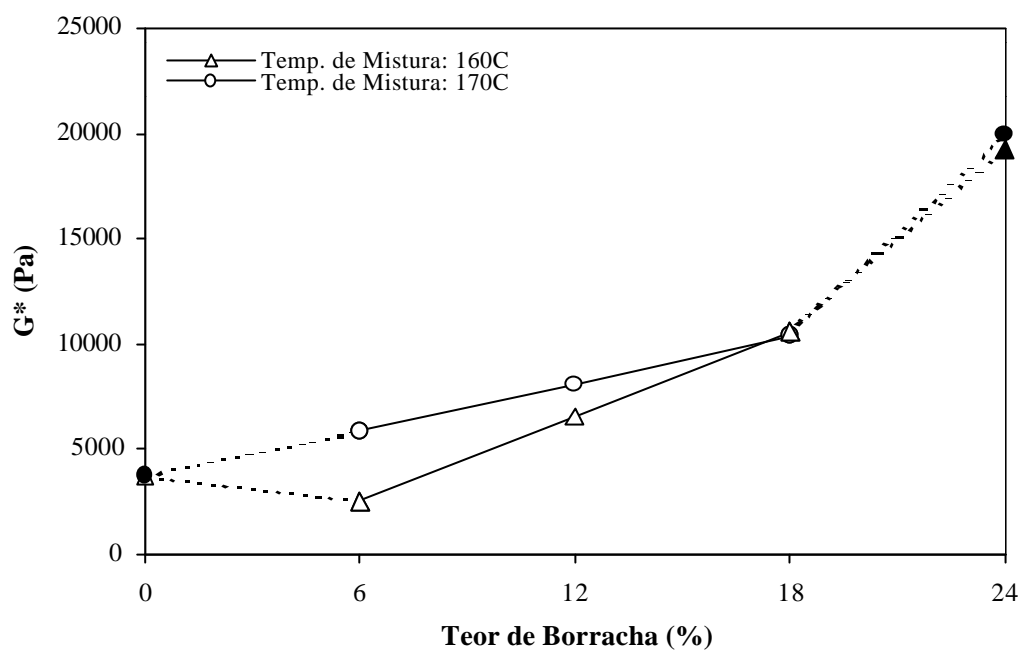


FIGURA 6.40 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo

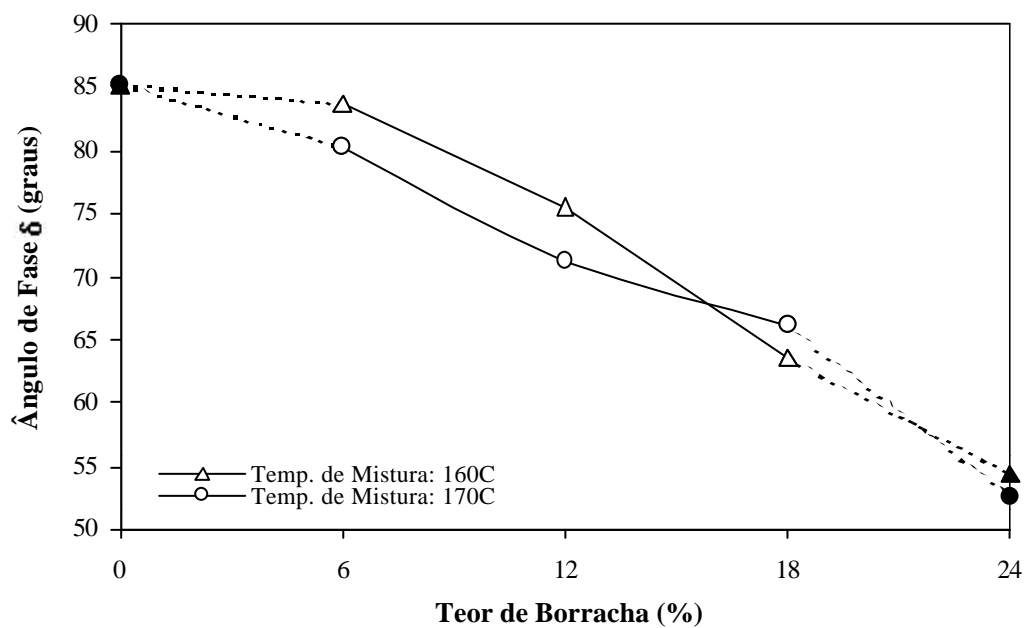


FIGURA 6.41 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo

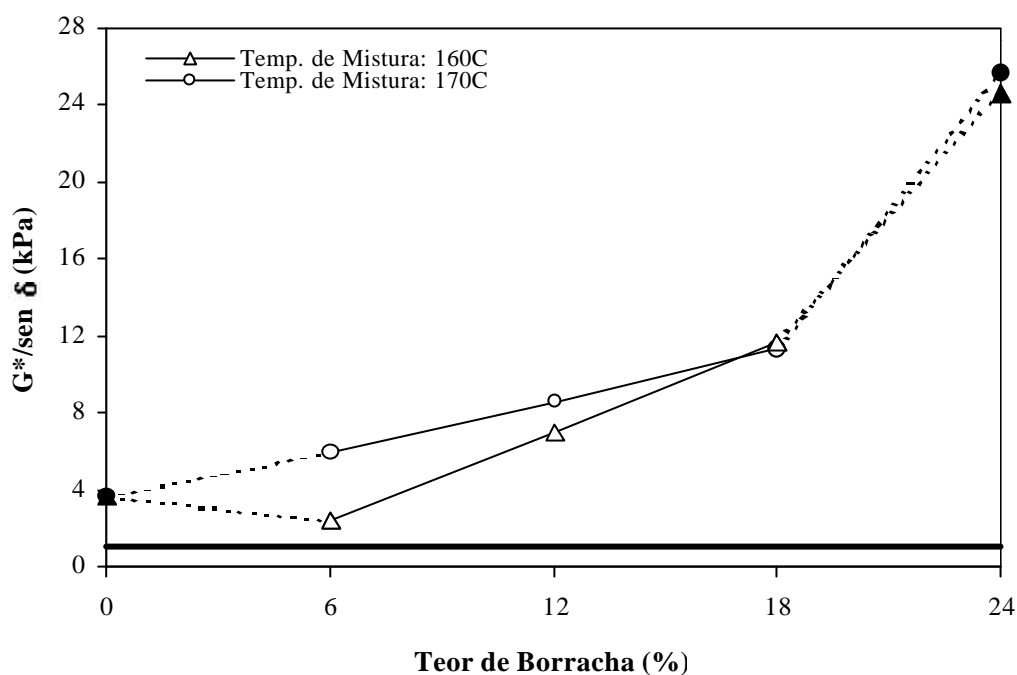


FIGURA 6.42 - Efeito do teor de ligante nas resistências à deformação permanente do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo

Os resultados da análise de variância do ensaio DSR (G^* , δ e $G^*/\text{sen}\delta$) do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de curto prazo mostra que o tamanho das partículas não exerce influência no comportamento do ligante asfalto-borracha e apenas o teor de borracha e a temperatura de mistura são incluídos no modelo estatístico.

Há um aumento do módulo de cisalhamento dinâmico (Figura 6.40) e uma diminuição do ângulo de fase (Figura 6.41) com o aumento do teor de borracha, sendo que no intervalo de 6 a 18% o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ é menor para menores temperaturas de mistura (Figura 6.42).

g) Cisalhamento Dinâmico após Envelhecimento de Longo Prazo

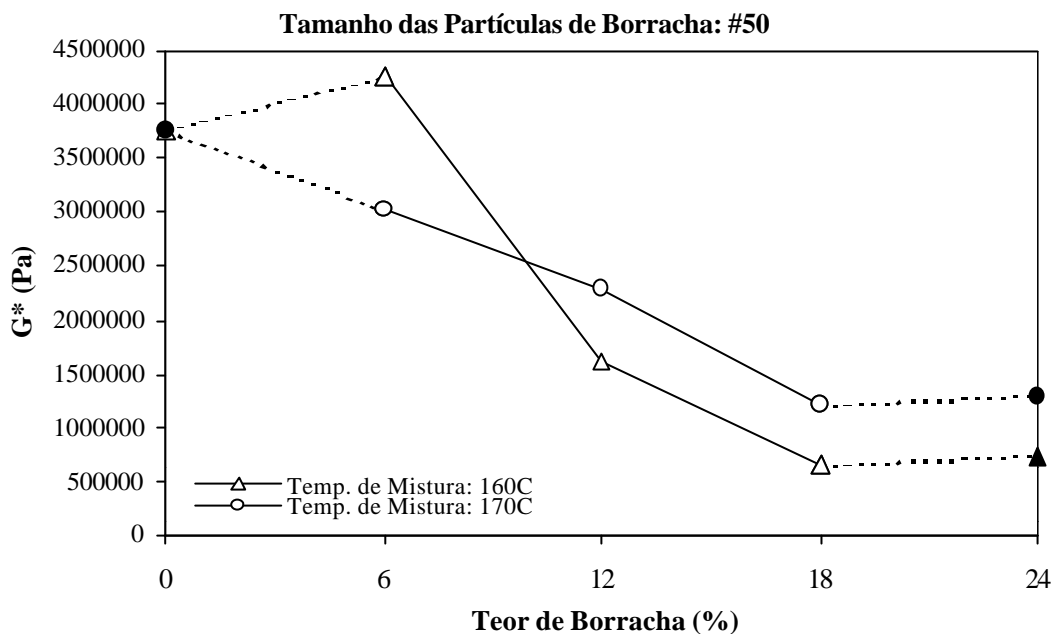


FIGURA 6.43 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

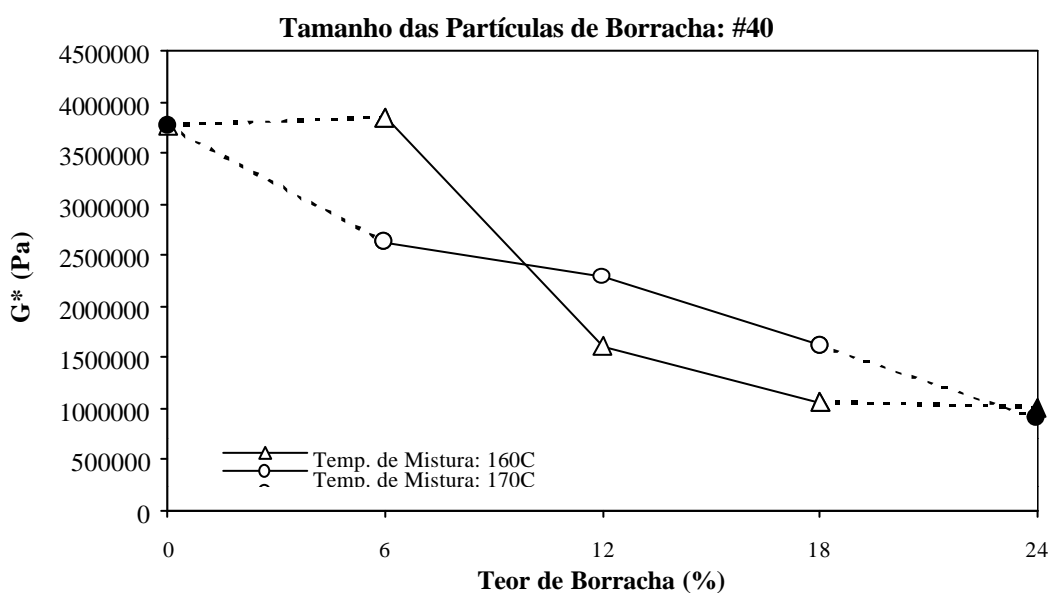


FIGURA 6.44 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

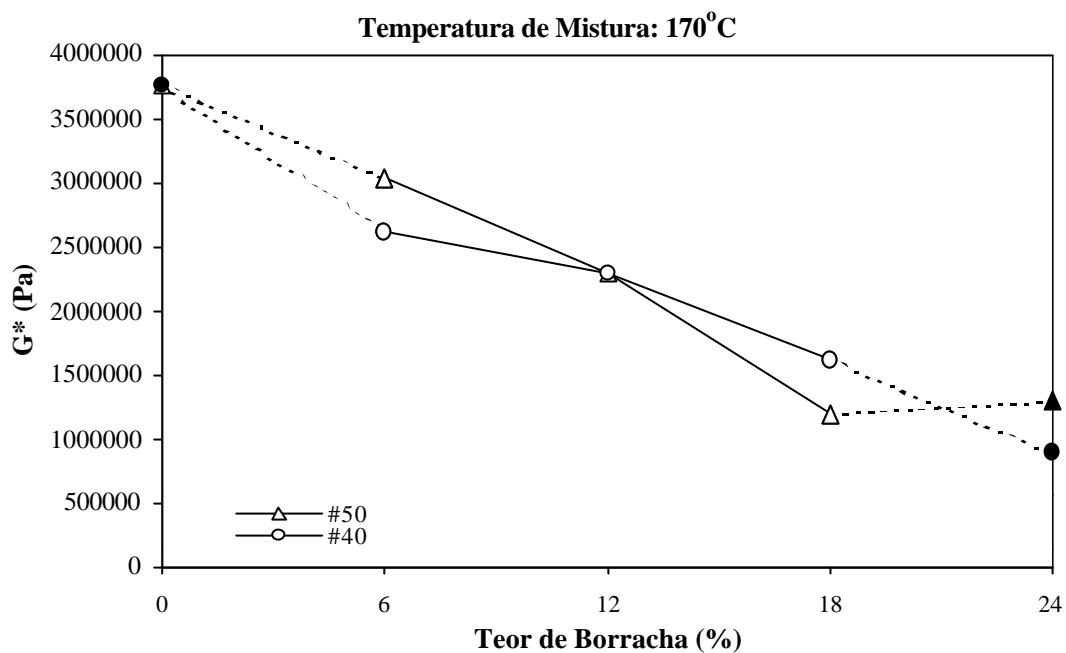


FIGURA 6.45 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

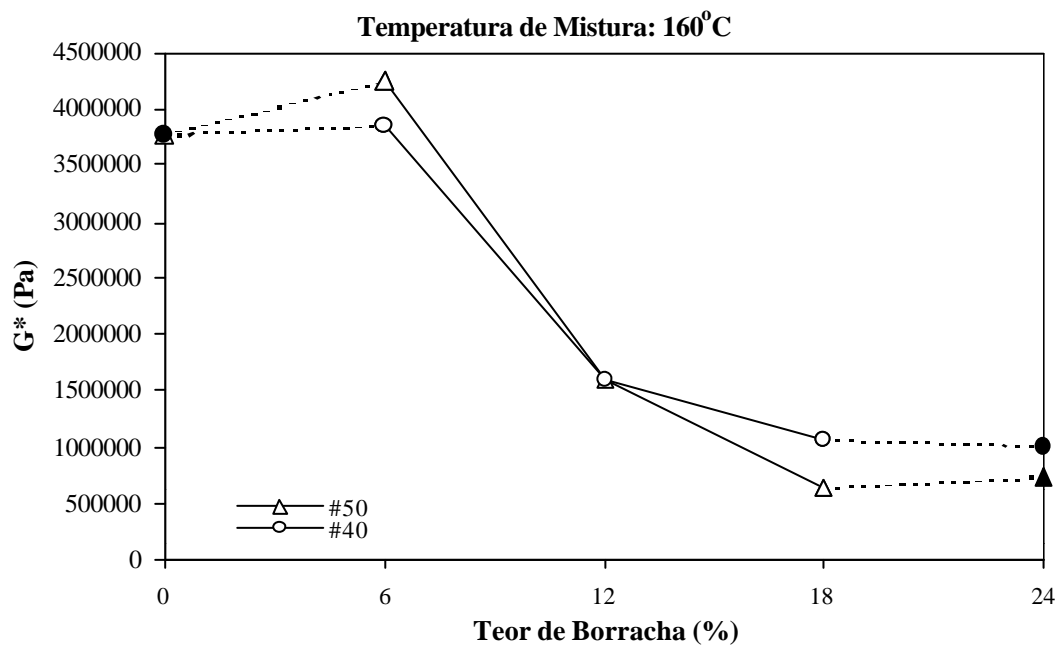


FIGURA 6.46 - Efeito do teor de borracha no módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

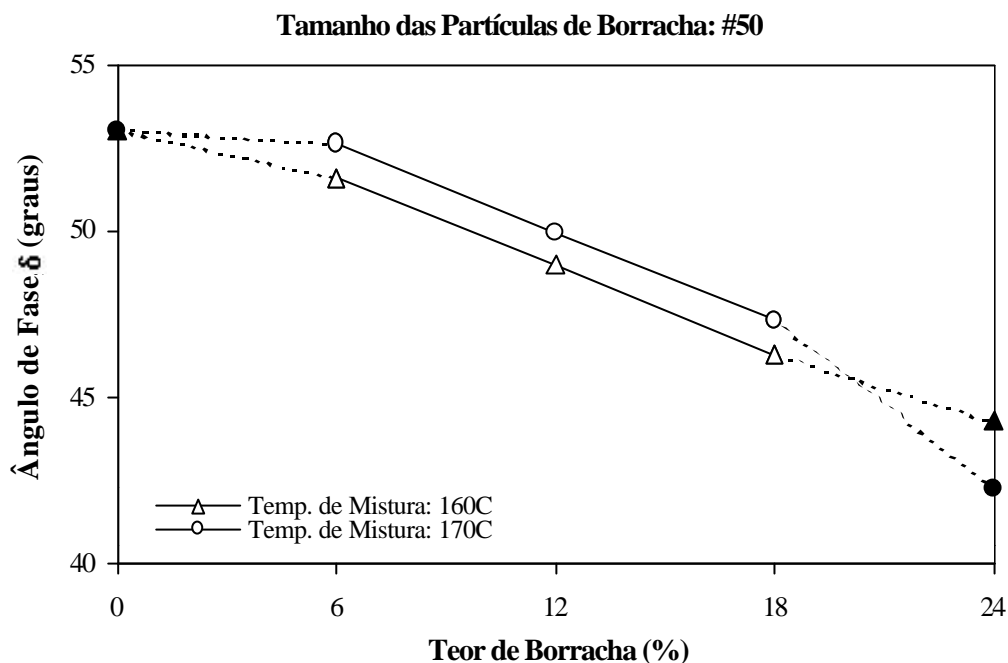


FIGURA 6.47 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

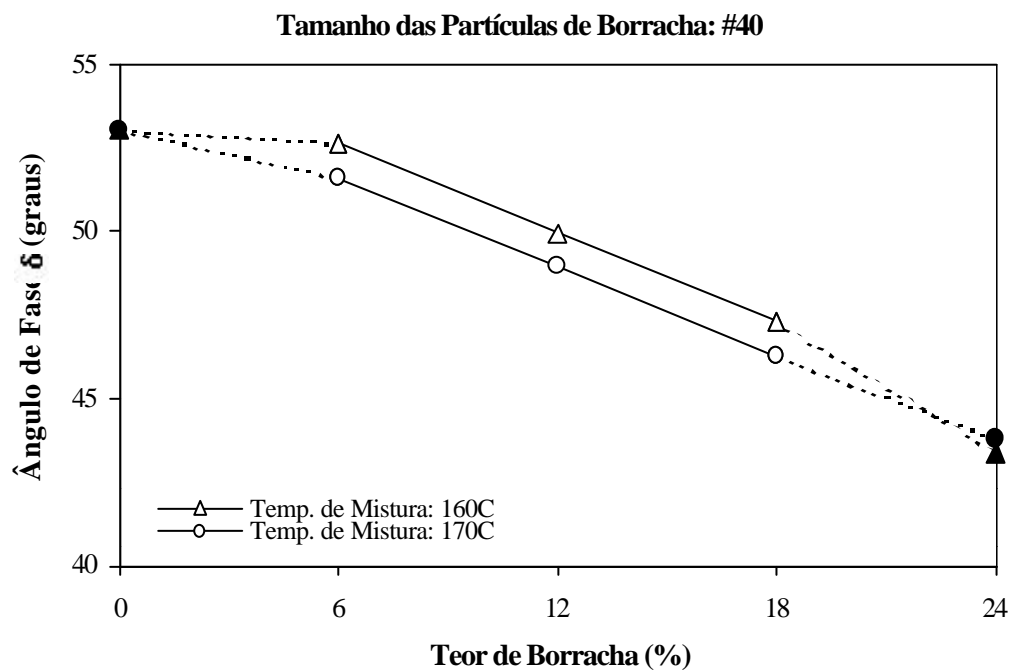


FIGURA 6.48 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

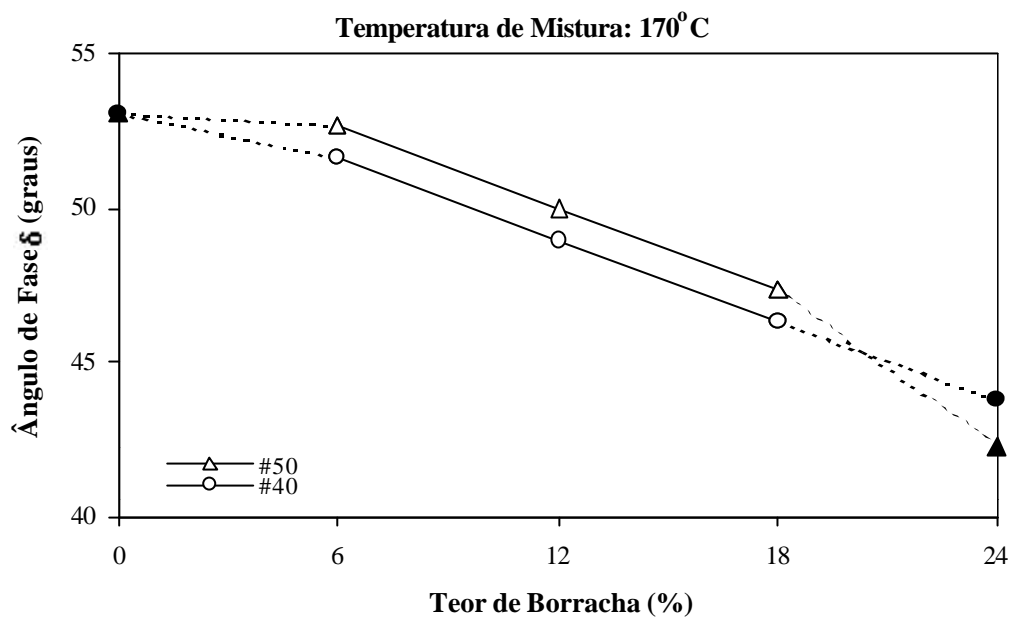


FIGURA 6.49 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

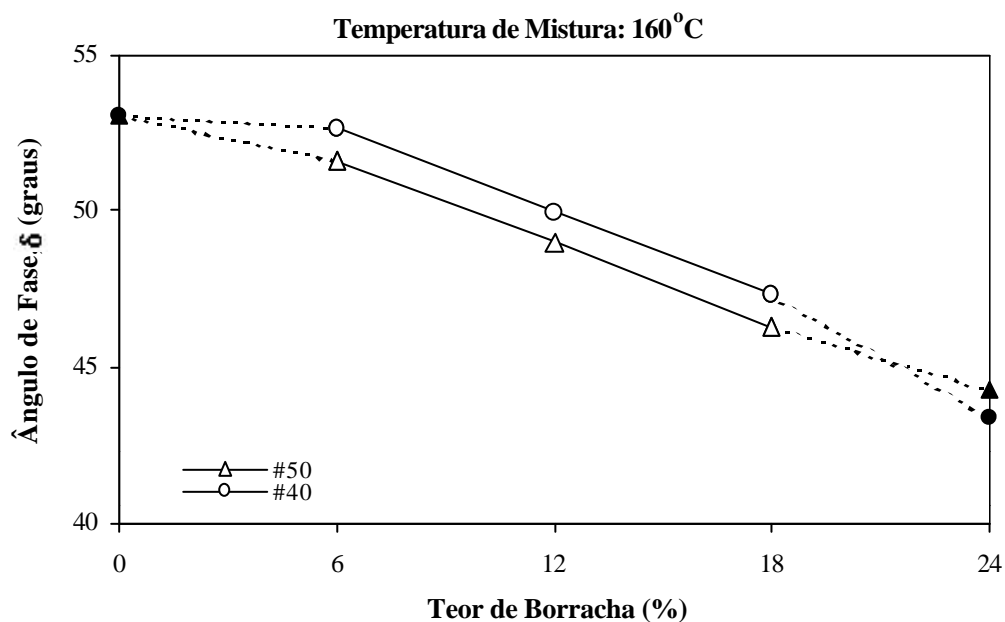


FIGURA 6.50 - Efeito do teor de borracha no ângulo de fase do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

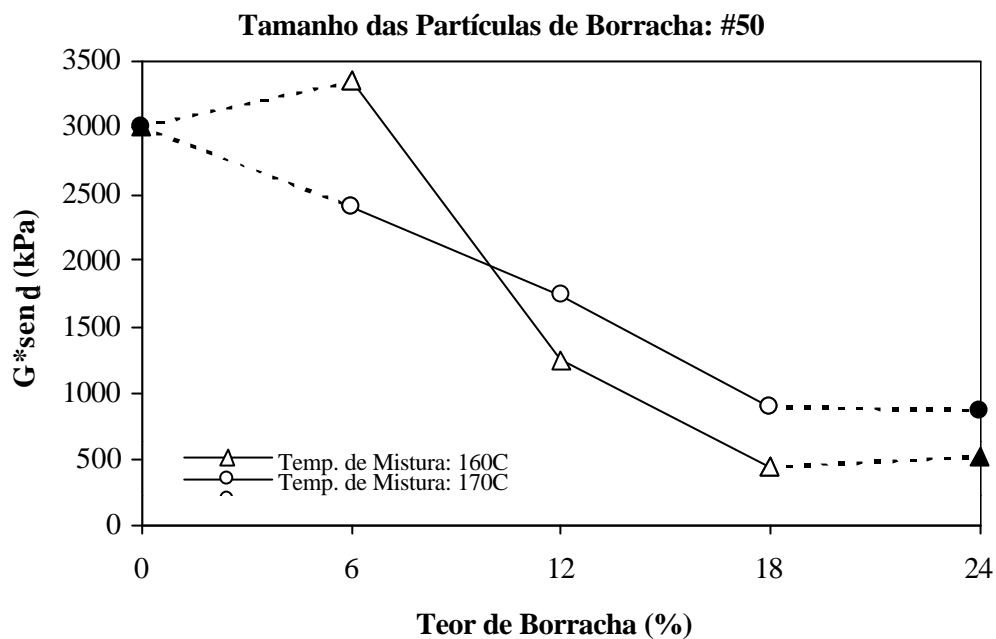


FIGURA 6.51 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

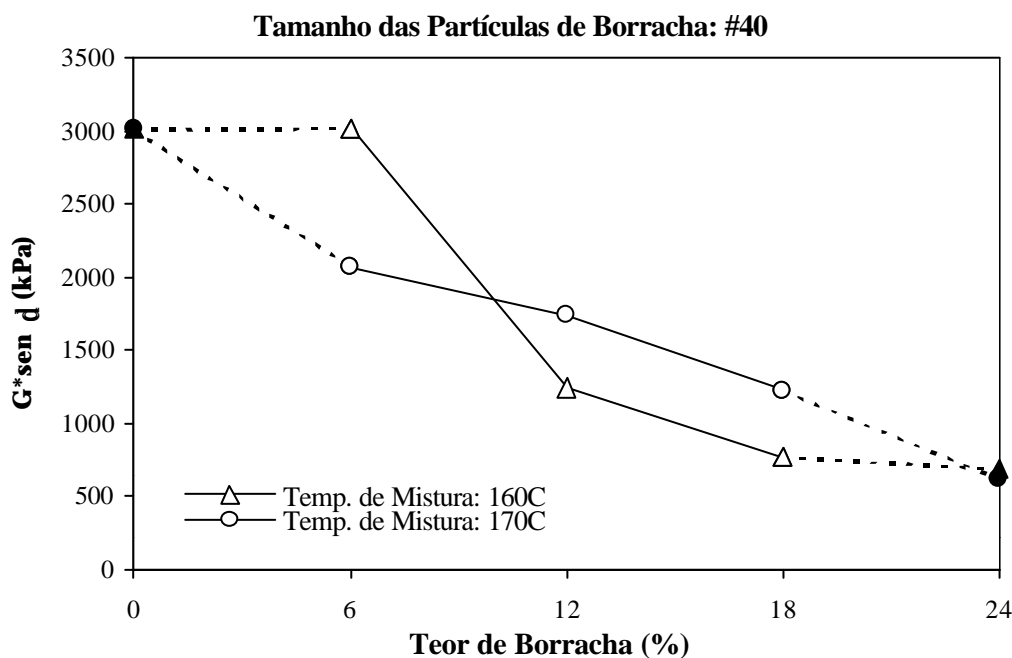


FIGURA 6.52 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

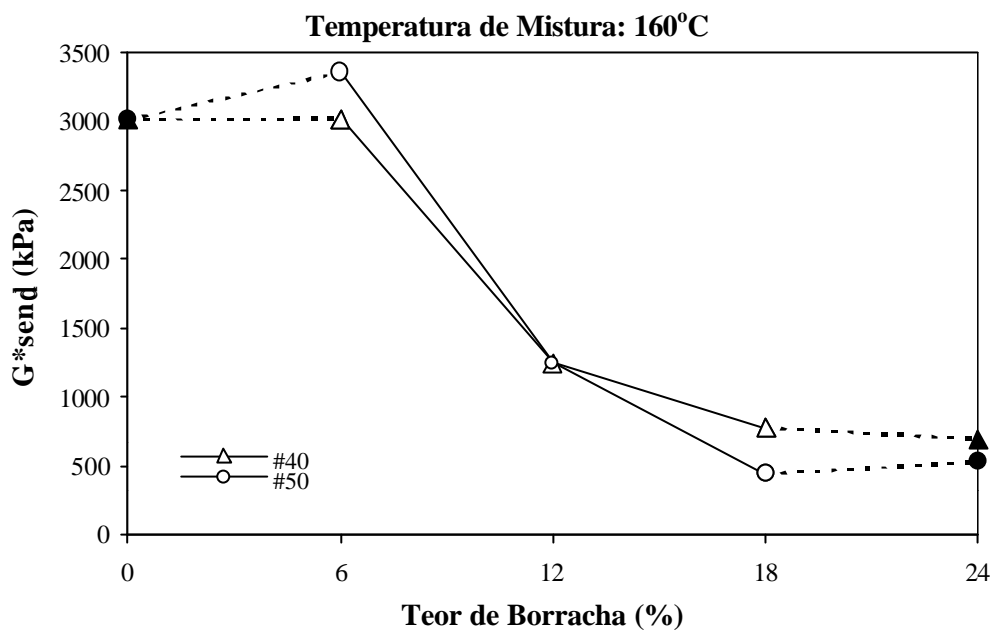


FIGURA 6.53 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

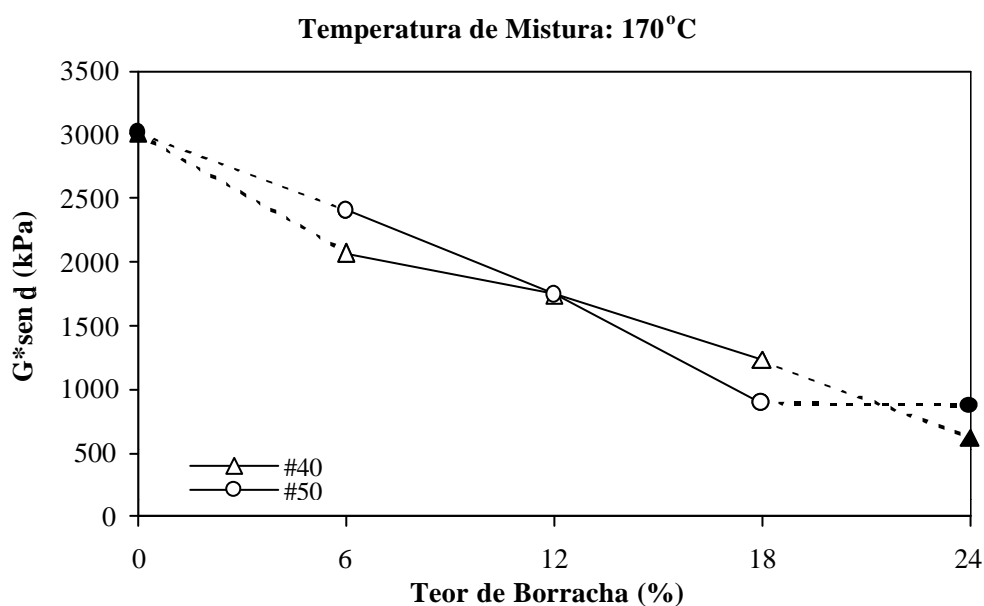


FIGURA 6.54 - Efeito do teor de borracha na resistência à formação de trincas por fadiga do ligante asfalto-borracha após envelhecimento de longo prazo

Pode-se verificar que o comportamento do ligante asfalto-borracha após o envelhecimento de longo prazo apresenta uma redução do parâmetro $G^*\text{sen}\delta$ com o aumento do teor de borracha, o que indica um acréscimo na resistência a formação de trincas por fadiga (Figuras 6.51 a 6.54). Deve-se ressaltar que todas as amostras ensaiadas apresentaram resultados de $G^*\text{sen}\delta$ abaixo do valor máximo estabelecido pela especificação Superpave.

Para os teores de 12 e 18%, a rigidez do ligante é maior para a maior temperatura de mistura (170°C , Figuras 6.43 e 6.44) e para a maior tamanho de partículas de borracha (#40, Figuras 6.45 e 6.46). Já o ângulo de fase é maior quando ocorrem as combinações de maior temperatura de mistura com partículas menores (Figuras 6.47 e 6.49) ou menor temperatura de mistura com partículas maiores (Figuras 6.48 e 6.50).

h) Rigidez à Fluência na Flexão

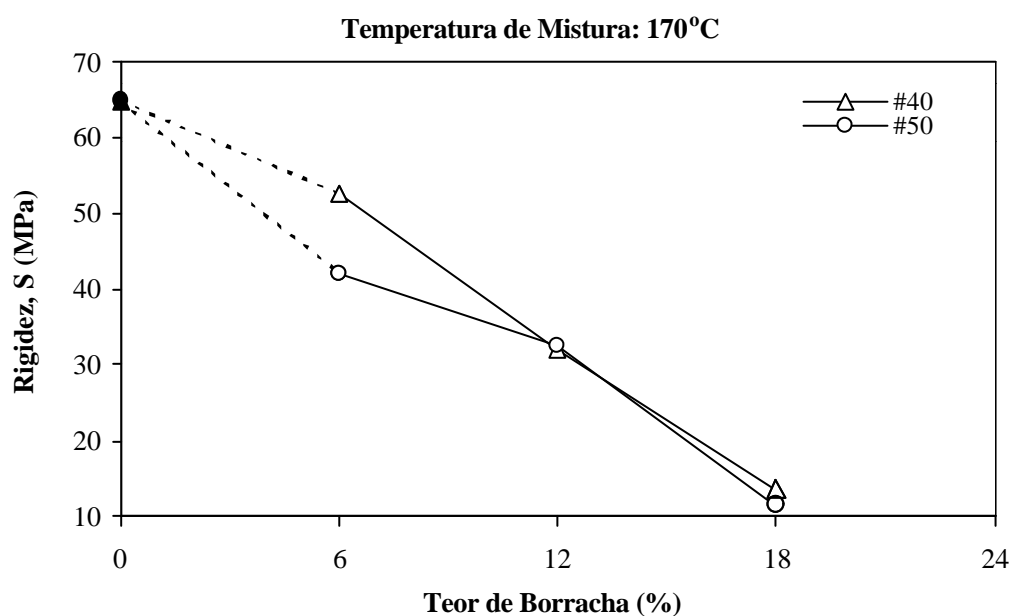


FIGURA 6.55 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

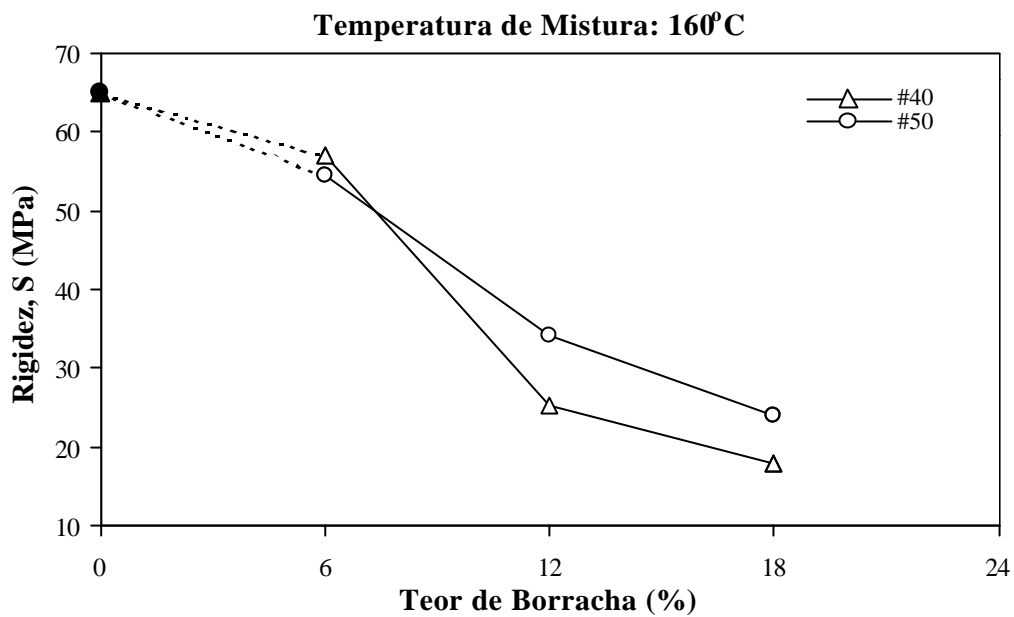


FIGURA 6.56 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

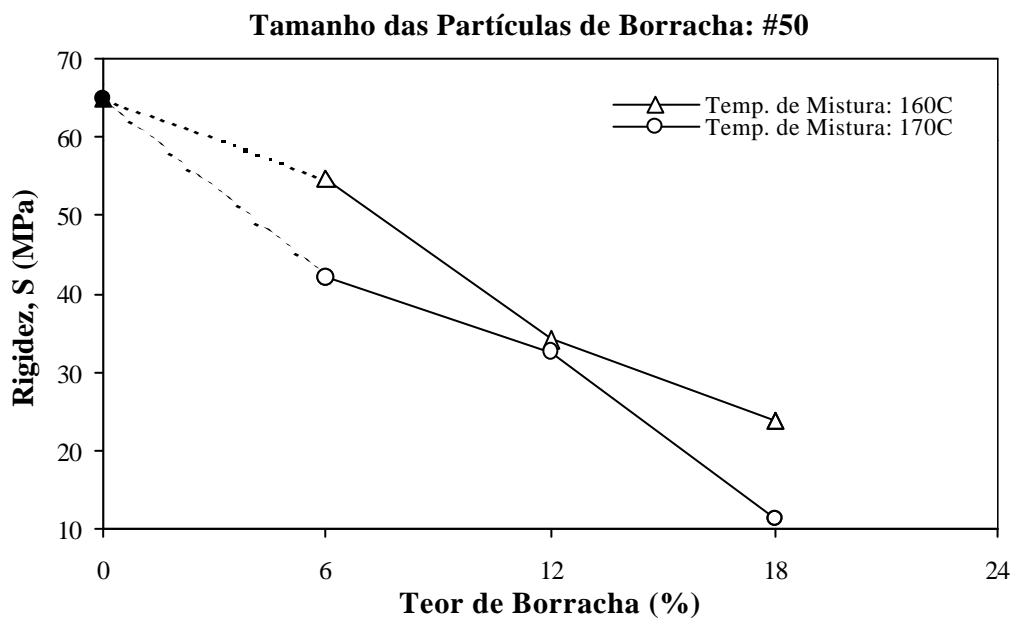


FIGURA 6.57 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

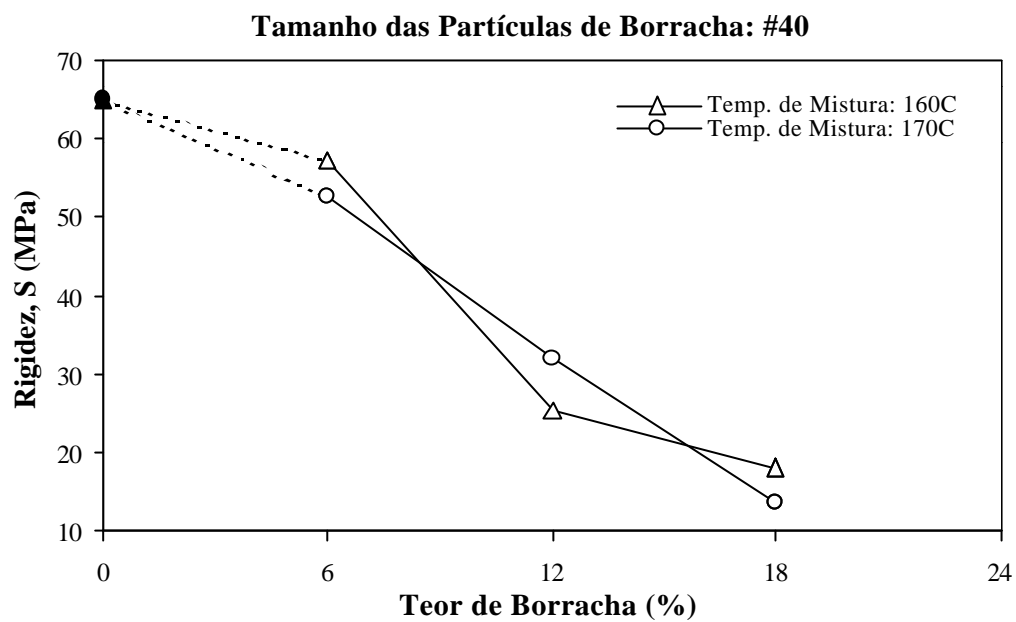


FIGURA 6.58 - Efeito do teor de borracha na rigidez do ligante asfalto-borracha

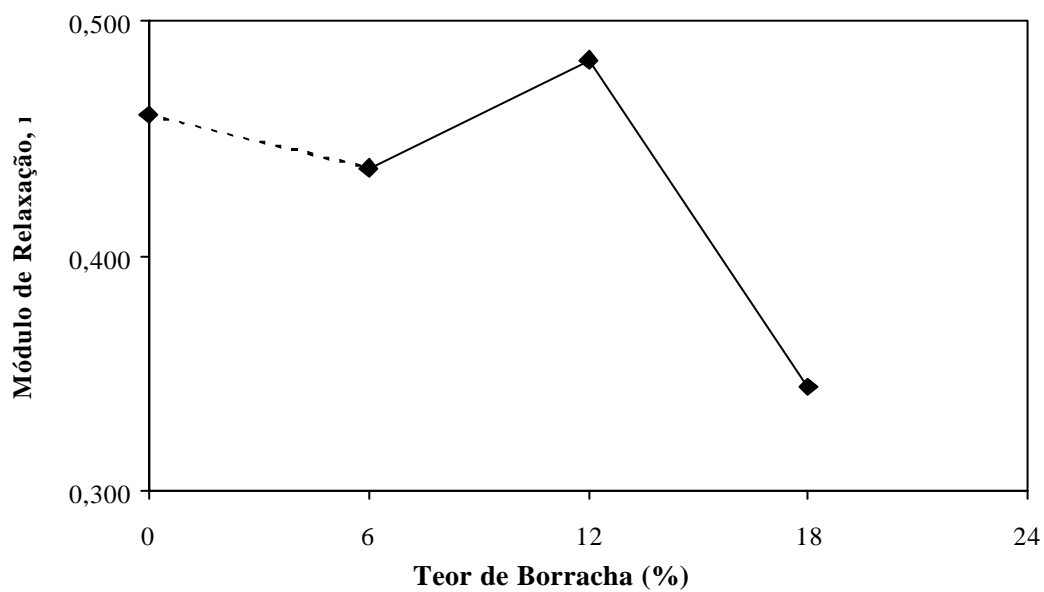


FIGURA 6.59 - Efeito do teor de borracha no módulo de relaxação (m) do ligante asfalto-borracha

Há uma redução da rigidez com o aumento do teor de borracha (Figuras 6.55 a 6.58), embora não se observe um padrão de comportamento associado à temperatura de mistura ou tamanho das partículas. Há uma tendência de diminuição do módulo de relaxação (m) com o teor de borracha (Figura 6.59), embora tenha ocorrido um aumento para o teor de 12% (o que é importante, pois o desempenho do ligante é melhor quanto maior for o m).