Fernando Aleixo Cardoso

ESTUDO DO DESEMPENHO DOS COMPOSTOS DE BORRACHA UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DA BANDA DE RODAGEM DOS PNEUS AUTOMOTIVOS EM FUNÇÃO DOS PAVIMENTOS DAS RODOVIAS

São Paulo

2010

Fernando Aleixo Cardoso

ESTUDO DO DESEMPENHO DOS COMPOSTOS DE BORRACHA UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DA BANDA DE RODAGEM DOS PNEUS AUTOMOTIVOS EM FUNÇÃO DOS PAVIMENTOS DAS RODOVIAS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Deniol Katsuki Tanaka

São Paulo

2010

Este exemplar foi revisado e alterac responsabilidade única do autor e c	lo em relação à versão original, sob com a anuência de seu orientador.
São Paulo, de julho de 2010.	
Assinatura do autor	0
Assinatura do orientador	- TOUT

FICHA CATALOGRÁFICA

Cardoso, Fernando Aleixo Estudo do desempenho dos compostos de borracha utilizados na fabricação da banda de rodagem dos pneus automotivos em função dos pavimentos das rodovias / F.A. Cardoso. -ed.rev. -- São Paulo, 2010. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 1. Desgaste dos materiais 2. Ensaios dos materiais 3. Pneus 4. Borracha 5. Pavimentação 1. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

ii

iii

DEDICATÓRIA

A todos aqueles que contribuíram para minha formação, me ensinando a acreditar nos sonhos e perseverar.

A minha madrinha Emília e aos meus padrinhos Aleixo e Francisco.

A minha mãe Alzira, ao meu irmão Alberto e ao meu pai Arlindo (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

É gratificante chegar neste momento e perceber quantas pessoas colaboraram para o andamento das atividades, muitas vezes até antes mesmo de eu cogitar a possibilidade de cursar a pós-graduação.

Ao Professor Tanaka pelas várias revisões deste texto e pela orientação, desde a época da iniciação científica, dando a mim a oportunidade e o exemplo de trabalhar na área de pesquisa e desenvolvimento.

Ao Professor Amilton Sinatora que despertou em mim o interesse pela tribologia.

Aos Professores Roberto Martins de Souza e Carlos Henrique da Silva pelas valiosas observações sobre forma e conteúdo textuais.

Aos colegas do *Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da USP,* uma grande família: Leandro, Raquel, Francisco, Jovânio, Martins, Felipe, Márcio, Márcio Cuppari, Maria Cristina, Carlão, Márcia, Telésforo, Sidnei, Silene, Ricardo, entre tantos outros.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP: a Professora Liedi Bernucci e o Edson Moura, sempre dispostos a ajudar um colega com curiosidade sobre pavimentos.

Aos colegas da *Pirelli Pneus*, por toda a ajuda e disponibilidade: Sr. Ortoni, Tâmara, Fernando Moretti, Igor Zucato e sem esquecer do Everton, que abriu as portas de sua casa para que eu pudesse continuar meu trabalho.

Ao pessoal do *Laboratório da Pirelli Pneus*, pela receptividade e profissionalismo, representados pelo Sr Augusto e Gilberto.

Ao Argemiro, que com o seu incentivo e constante apoio tornou possível que eu e outros colegas pudéssemos cursar a pós-graduação, sempre disposto a ajudar e a aconselhar.

A minha mãe Alzira, que mesmo nos momentos mais difíceis sempre garantiu que eu pudesse me dedicar aos estudos. A minha madrinha Emília e aos meus padrinhos Aleixo e Francisco, que contribuíram para que eu tivesse uma boa educação. Ao meu pai Arlindo (*in memoriam*) pelos momentos em que estivemos juntos. Ao meu irmão Alberto, por estar sempre presente.

Agradeço também a minha namorada Tatiana por toda a torcida e compreensão, principalmente nos finais de semana em que precisava me dedicar ao mestrado.

PADRÃO

O esforço é grande e o homem é pequeno. Eu, Diogo Cão, navegador, deixei Este padrão ao pé do areal moreno E para diante naveguei.

A alma é divina e a obra é imperfeita. Este padrão sinala ao vento e aos céus Que, da obra ousada, é minha a parte feita: O por-fazer é só com Deus.

E ao imenso e possível oceano Ensinam estas Quinas, que aqui vês, Que o mar com fim será grego ou romano: O mar sem fim é português.

E a Cruz ao alto diz que o que me há na alma E faz a febre em mim de navegar Só encontrará de Deus na eterna calma O porto sempre por achar

Fernando Pessoa Mensagem Segunda Parte: Mar Português

RESUMO

O estudo do comportamento quanto ao desgaste de compostos de borracha utilizados na banda de rodagem de pneus automotivos é um fator determinante para o desenvolvimento de produtos mais duráveis, que se adaptem às condições de severidade de diferentes mercados. Para tanto os formuladores precisam desenvolver compostos em um processo interativo, no qual são alterados os componentes da receita e seus níveis na formulação em função da resposta do produto.

A tarefa de avaliar o desgaste do pneu é desafiadora pois este comportamento pode ser influenciado por muitos fatores, tais quais o pavimento, o veículo, o motorista e condições climáticas. Os testes de pneus com veículos em campo proporcionam uma avaliação do desgaste mas necessitam por volta de 6 meses para apresentar resultados, além de serem custosas.

Equipamentos de laboratório foram desenvolvidos para agilizar a obtenção de dados mas freqüentemente apresentam severidade muito maior que aquela encontrada em campo. Através de parceria científica e tecnológica entre a Escola Politécnica da USP e a Pirelli Pneus, foi desenvolvido equipamento de laboratório que utiliza como contra-corpo amostras de asfalto retiradas das rodovias, trabalhando sob condições controladas.

A primeira parte deste trabalho apresenta que esta máquina de testes é capaz de reproduzir o mecanismo de desgaste encontrado em pneus (ondas de Schallamach), simulando as condições de campo e classificando os diferentes compostos em laboratório de modo semelhante ao obtido nos testes em campo.

A parte final deste trabalho apresenta a análise do desgaste de composto de borracha em função de diferentes tipos de pavimentos encontrados em rodovias brasileiras.

Em um pavimento em boas condições de conservação (ausência de buracos e irregularidades) a sua microtextura terá influência significativa no desempenho dos compostos de borracha utilizados na banda de rodagem dos pneus automotivos

Palavras-chave: desgaste, compostos de borracha, teste de laboratório

ABSTRACT

The wear behavior of tire tread rubber compounds is a fundamental factor in order to develop durable products, which can deal with the severity conditions of a multitude of markets. The rubber compounders must develop products in an interactive process, in which the ingredients and its levels are changed as a function of the market response

The tire wear assessment is challenging because this behavior can be influenced by a multitude of factors, as the pavement, the vehicle, the driver and the weather conditions. Outdoor tests in vehicles provide a wear assessment but are expensive and need around 6 months to present results.

Laboratory devices were developed to accelerate the data acquisition but frequently present a severity much higher than outdoor tests. A scientific and technological partnership between Escola Politécnica da USP and Pirelli Tires developed laboratory equipment that uses asphaltic counterfaces extracted from Brazilian roads, working under controlled conditions.

The first part of this work presents that this testing machine can reproduce the tire wear mechanism (Schallamach waves), simulating the outdoor conditions and sorting the different rubber compounds in a way similar to the outdoor tests.

The last part of this work presents a wear analysis of a rubber compound as a function of different pavements found in Brazilian roads.

For a pavement with good integrity (absence of holes and irregularities) its microtexture will significantly influence the performance of vehicle tire tread rubber compounds.

Keywords: wear, rubber compounds, laboratory test

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tipo estrutural de pneu diagonal e radial, SAKAI (2001)	5
Figura 2: Componentes do pneu radial, GENT (2005)	5
Figura 3: Cadeias moleculares da borracha e suas ligações, (Modificado de HEISLER, 2002)) 3
Figura 4:Atraso entre tensão e deformação para material viscoelástico)
Figura 5: Ciclo de histerese, relações entre módulos de armazenagem, perda e ângulo de	
fase, GENT (2005)11	I
Figura 6: Principais características dos compostos de borracha apresentados14	1
Figura 7: Representação de agregado de negro de fumo15	5
Figura 8: Resistência ao desgaste em função da área superficial do negro de fumo, MARK	
(2005)	3
Figura 9: Propriedades mecânicas do composto de borracha em função do nível de negro de	Э
fumo na formulação. MARK (2005)17	7
Figura 10: Comparação entre características de sílica e negro-de-fumo na formulação da	
banda de rodagem18	3
Figura 11: Cadeias moleculares da borracha: A) Não vulcanizada; B) Vulcanizada.	
(Modificado de MARK, 2005))
Figura 12: Propriedades mecânicas de elastômero vulcanizado em função da densidade de	
suas ligações cruzadas. MARK (2005)20)
Figura 13: Esquema de reômetro de disco oscilante. (Modificado de MARK, 2005)22	2
Figura 14: Curva reométrica de um composto de borracha. DATTA (2001)22	2
Figura 15: Via urbana em Pompéia, Itália. BERNUCCI et al. (2006)	3
Figura 16: Primeira estrada pavimentada brasileira, a Calçada de Lorena. A) Visão parcial.	
B) Detalhe do pavimento. ZUCATO (2009)	3
Figura 17: Amostra de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). A) Seção	
transversal. B) Aspecto da superfície25	5
Figura 18: Amostra de matriz pétrea asfáltica (Stone Matrix Asphalt – SMA). A) Seção	
transversal. B) Aspecto da superfície25	5
Figura 19: Esquema de tratamentos superficiais asfálticos: A) Simples; B) Duplo.	
(Modificado de APS, 2006)	3
Figura 20: Amostra de tratamento superficial duplo (TSD). A) Seção transversal. B) Aspecto	
da superfície	3

Figura 21: Amostra de microrevestimento. A) Seção transversal. B) Aspecto da superfície 27
Figura 22: Microtextura e macrotextura em um revestimento asfáltico. HUNTER (1994)28
Figura 23: Teste de mancha de areia – A) ASTM E-965-96 – B) procedimento realizado pelo
LTP-EPUSP
Figura 24: A) Principais componentes do Pêndulo Britânico. (MAIN ROADS WESTERN
AUSTRALIA, 2009). B) Equipamento do LTP-EPUSP
Figura 25: Taxa de desgaste normalizado de pavimento seco em função da temperatura
superficial de pneu com SBR na formulação da rodagem. R representa teste realizado um
dia após chuva moderada (5 mm). HR representa teste realizado um dia após chuva forte
(25 mm). VEITH (1986)
Figura 26: representação esquemática de vista superior de pneu sob a ação de ângulo de
deriva. GARRETT <i>et al.</i> (2001)
Figura 27: representação esquemática de pneu sob a ação de ângulo de deriva. (Modificado
de WONG, 2001)
Figura 28:Atuação do ângulo de cáster. (Modificado de HEISLER, 2002)
Figura 29: Ilustração da independência da força de atrito com a área aparente de contato
[LEONARDO 4]
Figura 30: Bloco de borracha em contato com sólido rugoso, PERSSON (2006)
Figura 31: Tribossistema do desgaste entre pneu e pavimento, COSTA (2007)
Figura 32: Representação esquemática dos mecanismos básicos de desgaste, ZUM GAHR
(1987)
Figura 33:Exemplo de desgaste a 2 e a 3 corpos, ZUM GAHR (1987)41
Figura 34: Marcas de Schallamach, GENT (2005)42
Figura 35: Morfologia do desgaste para dois compostos de borracha natural vulcanizados e
reforçados com diferentes níveis de negro de fumo. Contra-corpo de concreto áspero.
Direção de deslizamento de baixo para cima. A) 45 phr de NF B) 25 phr de NF.
SCHALLAMACH (1957)
Figura 36: Equipamento para execução do teste de abrasão DIN 53516. A) Princípio de
funcionamento. BROWN (1996). B) Visão geral. COSTA (2007)
Figura 37: LAT 100 para desgaste de borrachas. A) visão geral B) detalhe da roda de
borracha e do disco de <i>corundum</i> (óxido de alumínio). COSTA (2007)
Figura 38:Diagrama para compreender os resultados do planejamento fatorial
Figura 39: Resumo das atividades com a máquina de testes
Figura 40: Corpo-de-prova utilizado na máquina de testes51
Figura 41: A) Dispositivo utilizado para a extração do contra-corpo na rodovia Santos
Dumont SP-75 (equipamento do LTP-EPUSP); B) contra-corpo52

Figura 42: Aspecto da superfície dos Contra-corpos: A) M2, B) Microrrevestimento, C)
TSD, D) SMA, E) CBUQ
Figura 43:máquina para desgaste de roda de borracha contra disco de asfalto56
Figura 44: Corpo-de-prova com atuação dos parâmetros de ensaio. V: velocidade, C: carga
aplicada e A: ângulo de deriva57
Figura 45: Morfologia do desgaste encontrado em pneus de caminhão na qual observam-se
ondas de Schallamach. (Modificado de COSTA, 2007)58
Figura 46: Distribuição F com nível de significância de 95%61
Figura 47: Parâmetros envolvidos no planejamento fatorial62
Figura 50: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com
pavimento M2 e composto B4. A) Região da ampliação; B) ondas de Schallamach e C)
riscos longitudinais. Condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h66
Figura 51: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com
pavimento M2 e composto B4. A) Região da ampliação; B) ondas de Schallamach e C)
riscos longitudinais. Condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h66
Figura 52: Morfologia do desgaste encontrado na borda dos corpo-de-prova ensaiados com
pavimento M2 e composto B4. Condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h.
NAKATU (2006)
Figura 53:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2,
condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 18)73
Figura 54:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2,
condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 19)73
Figura 55:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2,
condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 20)74
Figura 56:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2,
condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 21)74
Figura 57:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2,
condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 22)75
Figura 58:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2,
condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 23)75
Figura 59:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2,
condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 24)76
Figura 60:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2,
condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 25)76
Figura 61:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2,
condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 26)77

Figura 62:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, Figura 63: Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, Figura 64:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 29)78 Figura 65: Perda de massa acumulada. Composto de borracha B4, pavimento M2, Figura 66: Perda de massa acumulada . Composto de borracha B4, pavimento M2, Figura 67: Perda de massa acumulada. Composto de borracha B4, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 32) 80 Figura 68: Perda de massa acumulada . Composto de borracha B4, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 33) 80 Figura 69: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em Figura 70: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função da área superficial do negro de fumo da formulação. A) Laboratório. B) Campo......82 Figura 71: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em Figura 72: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em Figura 73: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em Figura 74: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com o pavimento CBUQ, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU Figura 75: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com o pavimento SMA, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU Figura 76: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com o pavimento Microrrevestimento, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. Figura 77: Morfologia do desgaste encontrado nos corpos-de-prova ensaiados com o pavimento TSD, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da textura (ASTM E-867, 1997)	28
Tabela 2: Classificação de textura de um pavimento (SHAHIN, 1994)	29
Tabela 3: Parâmetros do planejamento fatorial 2 ²	47
Tabela 4: Resultados do planejamento fatorial 2 ²	47
Tabela 5: Denominação e procedência dos corpos-de-prova testados	51
Tabela 6: Denominação e procedência dos contra-corpos utilizados	51
Tabela 7: Propriedades mecânicas dos compostos de borracha testados	51
Tabela 8: Formulação dos compostos de borracha testados	52
Tabela 9: Classificação da macrotextura e microtextura dos contra-corpos utilizados	52
Tabela 10: Características da máquina de teste	55
Tabela 11:Parâmetros dos ensaios	57
Tabela 12:Exemplo do efeito da área de contato na taxa de desgaste	59
Tabela 13: Parâmetros principais do planejamento fatorial do teste em laboratório	62
Tabela 14: Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o	
composto B1	64
Tabela 15 - Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o	
composto B2	65
Tabela 16: Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o	
composto B3	65
Tabela 17: Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o	
composto B4	65
Tabela 18: Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavim	ento
M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h	67
Tabela 19:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavime	ento
M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h	68
Tabela 20:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavime	ento
M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h	68
Tabela 21:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavime	ento
M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h	68
Tabela 22:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavime	ento
M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h	69

Tabela 23:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento
M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h69
Tabela 24:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento
M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h69
Tabela 25:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento
M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h70
Tabela 26:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento
M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h70
Tabela 27:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento
M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h70
Tabela 28:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento
M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h71
Tabela 29:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento
M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h71
Tabela 30:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento
M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h71
Tabela 31:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento
M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h72
Tabela 32:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento
M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h72
Tabela 33:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento
M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h72
Tabela 34: Resumo dos resultados de testes em laboratório do desgaste dos compostos B1,
B2, B3 e B4
Tabela 35: Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento
Microrrevestimento, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h87
Tabela 36:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento
TSD, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h87
Tabela 37:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento
SMA, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h87
Tabela 38:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento
CBUQ, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h87
Tabela 39: Valores de taxa de desgaste específica para testes com diferentes pavimentos
realizados com velocidade 2 km/h90
Tabela 40 - Análise estatística dos dados de campo dos compostos B1, B2, B3 e B4 através
de uma distribuição F(3,36) 95%92

Tabela 41: Análise estatística dos resultados de teste em laboratório com ângulo de deriva de 2 graus para s compostos B1, B2, B3 e B4 através de uma distribuição F(3,12) 95% 93 Tabela 42: Análise estatística dos resultados de teste em laboratório com ângulo de deriva de 5 graus para s compostos B1, B2, B3 e B4 através de uma distribuição F(3,12) 95% 93 Tabela 43:Dados para o planejamento fatorial 22 do composto de borracha B1......96 Tabela 44:Resultados do planejamento fatorial 2² do composto de borracha B1. A - Ângulo Tabela 46:Resultados do planejamento fatorial 22 do composto de borracha B2. A - Ângulo Tabela 48: Resultados do planejamento fatorial 22 do composto de borracha B3. A - Ângulo Tabela 49: Dados para o planejamento fatorial 22 do composto de borracha B4......97 Tabela 50: Resultados do planejamento fatorial 22 do composto de borracha B4. A - Ângulo Tabela 51: Análise estatística dos resultados de teste em laboratório do composto B5 com diferentes pavimentos através de uma distribuição F(3,4) 95% 100

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- w: frequência de excitação (Hz)
- t: tempo decorrido
- δ : ângulo de fase
- E*: módulo complexo
- E': módulo elástico
- E": módulo de perda
- G: módulo de cisalhamento
- Tg: temperatura de transição vítrea
- σ : tensão
- \mathcal{E} : deformação
- $\sigma_{\scriptscriptstyle 0}$: tensão máxima
- \mathcal{E}_0 : deformação máxima

phr: unidade de medida usada em formulação de compostos de borracha que se refere à quantidade de determinado composto em relação à quantidade total de borracha utilizada, definida em 100 partes de borracha ("**p**arts per **h**undred **r**ubber")

- F: força de atrito
- μ : coeficiente de atrito
- N: força normal
- Z: deslocamento do centro de pressão
- M: torque
- R: raio do cilindro

Bi: diferentes compostos de borracha utilizados no teste de desgaste em laboratório

s²: variância da amostra

 d_i : diferença entre observações

g: número de diferentes condições

CBUQ: Concreto betuminoso usinado a quente

TSD: Tratamento superficial duplo

SMA: Stone matrix asphalt (matriz pétrea asfáltica)

LTP – EPUSP: Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

α: ângulo de deriva

P: força lateral devido ao ângulo de deriva

γ: ângulo de câmber

Fyy: força lateral devido ao ângulo de câmber

 β : ângulo de cáster

V: velocidade de teste

C: carga aplicada ao teste

A: ângulo de deriva aplicado ao teste

CP: Corpo-de-prova

SUMÁRIO

1	l Ir 2 R	ntrod Revis	ução ão Bibliográfica	1 4
2.1	Со	mpo	nentes do Pneu	4
2.2	Po	límei	ros	7
2.2	2.1	Pro	priedades Dinâmicas	9
2.3	Fo	rmula	ação de Compostos de Borracha para Pneus	.11
2.3	3.1	Bor	racha Natural (NR)	.12
2.3	3.2	Bor	racha Sintética	.13
2	2.3.2	2.1	Borracha de Estireno Butadieno (SBR)	.13
2	2.3.2	2.2	Borracha de Poli Butadieno (BR)	.13
2	2.3.2	2.3	Borracha de Poli Isopreno (IR)	.13
2.3	3.3	Car	gas Reforçantes	.14
2	2.3.3	8.1	Negro de Fumo (NF)	.15
	2.3.3	8.2	Sílica	.17
2.3	3.4	Sist	ema Protetivo	.18
2.4	Vu	lcani	zação	.19
2.5	Ca	racte	erização do Pavimento	.23
2.5	5.1	Tipo	os de Revestimentos Asfálticos	.24
2.5	5.2	Gra	duação de Misturas Asfálticas Usinadas	.24
2	2.5.2	2.1	Graduação densa e bem graduada	.24
2	2.5.2	2.2	Graduação descontínua	.25
2.5	5.3	Trat	tamentos Superficiais Asfálticos	.26
2.5	5.4	Mic	rorrevestimento	.27
2.5	5.5	Cla	ssificação da Textura de Pavimentos	.27
2.5	5.6	Mét	odos de Medição de Textura em Pavimentos	.29
2	2.5.6	5.1	Medidas de Macrotextura em Pavimentos - Método da Mancha	de
ŀ	Areia	à		.29
2	2.5.6	5.2	Medidas de Microtextura em Pavimentos - Método do Pênc	lulo
E	Britâ	nico		.30
2.5	5.7	Influ	uência da Textura dos Pavimentos no Desgaste dos Pneus	.31

2.6 Pi	incipais Ângulos Atuantes nos Pneus	32
2.6.1	Ângulo de Deriva	32
2.6.2	2.6.2 Ângulo de Camber	
2.6.3	Ângulo de Cáster	34
2.7 At	rito e Desgaste na Interface Pneu Pavimento	35
2.7.1	Atrito	35
2.7.2	Desgaste	38
2.7.	2.1 Desgaste Abrasivo	41
2.7.	2.2 Deterioração Térmica e Química	41
2.7.	2.3 Deslizamento e Marcas de Schallamach	42
2.7.3	Máquinas de Desgaste de Borracha em Laboratório	43
2.8 Ar	nálise Estatística dos dados	46
2.8.1	Planejamento de Experimento e Análise de Variância (ANOVA)	46
2.8.2	Planejamento de Experimentos (Fatorial 2 ²)	47
2.	8.2.1.1 Cálculo dos Efeitos	47
2.	8.2.1.2 Estimativa do Erro Experimental	49
		40
2.	8.2.1.3 Interpretação dos Resultados	49
2. 3	8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos	49 50
2. 3 3.1 M	8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais	49 50 50
2. 3 3.1 M 3.1.1	8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características	49 50 50 51
2. 3 3.1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características 	49 50 51 52
2. 3 3.1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2 1	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos 	49 50 51 52 54
2. 3 3.1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2 2	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos Ensaio em Campo 	49 50 51 52 54 54
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos Ensaio em Campo Ensaio em Laboratório	49 50 51 52 54 54 54 54
2. 3 1 3.1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2.	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos	49 50 51 52 54 54 54 54 54
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2.	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos	49 50 51 52 54 54 54 54 54 54
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2.	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos	49 50 51 52 54 54 54 54 54 55 55
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2. 3.2. 3.2.3 3.2.4	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos. ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos. Ensaio em Campo Ensaio em Laboratório 2.1 Concepção e construção da máquina de testes 2.2 Características da Máquina de Teste 2.3 Metodologia de Ensaio Análise da Morfologia do Desgaste Normalização dos Resultados 	49 50 51 52 54 54 54 54 54 55 56 57
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2. 3.2.3 3.2.4 3.2.5	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos	49 50 51 52 54 54 54 54 54 55 56 56 57 59 59
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2. 3.2.3 3.2.4 3.2.5 3.2.6	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos. ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos. Ensaio em Campo Ensaio em Laboratório 2.1 Concepção e construção da máquina de testes 2.2 Características da Máquina de Teste 2.3 Metodologia de Ensaio Análise da Morfologia do Desgaste Normalização dos Resultados Tratamento dos Dados Planeiamento dos Ensaios 	49 50 51 52 54 54 54 54 54 55 56 56 57 59 61 61
2. 3 1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2. 3.2.3 3.2.4 3.2.5 3.2.6 4	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos Ensaio em Campo Ensaio em Laboratório 2.1 Concepção e construção da máquina de testes 2.2 Características da Máquina de Teste 2.3 Metodologia de Ensaio Análise da Morfologia do Desgaste Normalização dos Resultados Tratamento dos Dados Resultados 	49 50 51 52 54 54 54 54 54 54 55 56 56 57 59 61 62 62
2. 3.1 M 3.1.1 3.1.2 3.2 M 3.2.1 3.2.2 3.2. 3.2. 3.2.3 3.2.4 3.2.5 3.2.6 4.1 Values	 8.2.1.3 Interpretação dos Resultados Materiais e Métodos ateriais Corpos-de-Prova – Características Contra-Corpos – Características étodos Ensaio em Campo Ensaio em Laboratório 2.1 Concepção e construção da máquina de testes 2.2 Características da Máquina de Teste 2.3 Metodologia de Ensaio Análise da Morfologia do Desgaste Normalização dos Resultados Tratamento dos Dados Planejamento dos Ensaios Resultados alidação da Máquina de Ensaio 	49 50 51 52 54 54 54 54 54 54 55 56 56 57 59 61 62 63 64

4.1.2	Morfologia do Desgaste dos Testes em Laboratório	66
4.1.3	Resultados em Laboratório	67
4.2 Te	stes com Diferentes Tipos de Pavimentos	84
4.2.1	Morfologia do Desgaste dos Testes em Laboratório	84
4.2.2	Resultados em Laboratório	87
5 C 5.1 An	Discussão álise da Reprodução do Mecanismo de Desgaste de Compostos	91 de
Borracha	a na Máquina de Teste em Laboratório	91
5.2 Va	lidação da Máquina de Testes	91
5.2.1	Análise Estatística dos Resultados do Teste em Campo	91
5.2.2	Análise Estatística dos Dados da Máquina de Laboratório	92
5.2.3	Comparação entre Resultados em Campo e em Laboratório	93
5.2.4	Parâmetros da Máquina de Laboratório	96
5.3 An	álise dos Resultados de Desgaste dos Compostos de Borracha e	эm
Função	da Formulação	98
5.4 Es	tudo com Diferentes Pavimentos	99
5.4.1	Análise Estatística dos Dados	99
5.4.2	Classificação dos Pavimentos em Função do Desgaste1	00
5.4.3	Classificação dos Pavimentos em Função da Textura1	01
6 0	Conclusões1	04
7 T Refe	rabalhos Futuros1 rências Bibliográficas1	05 06
-	5	

1 Introdução

O pneu é um componente importante para a condução, conforto e segurança veicular, atuando como interface entre o veículo e a pista, sendo projetado para suportar e transmitir forças em diversas condições operacionais. Acelerações e desacelerações, forças laterais, irregularidades da pista e impacto são algumas das condições dinâmicas as quais o pneu está submetido. É uma das poucas estruturas mecânicas sujeita a grandes deflexões e deformações, confeccionado com materiais compósitos anisotrópicos e não lineares, sendo a borracha seu principal componente, que apresenta comportamento histerético e hiperelástico.

Ao longo de sua utilização o pneu sofre desgaste, principalmente em sua banda de rodagem, sua capacidade em apresentar maior durabilidade está diretamente ligada ao modo como o composto dessa região resiste às diferentes condições de uso.

Pensando nas condições de utilização do pneu, os formuladores de compostos de borracha precisam desenvolver materiais que se adequem a uma vasta realidade de mercados, em muitas ocasiões é necessário além do desgaste otimizar outras necessidades, que podem ser conflitantes, como menor consumo de combustível e maior aderência em pista molhada. É um processo interativo, no qual são alterados os componentes da receita e seus níveis na formulação.

Considerando que o desgaste de um pneu pode sofrer influência do tipo de pavimento, da topografia, do motorista, do veículo (velocidade e carga), de condições climáticas (temperatura ambiente, volume de chuvas) e sazonais (verão ou inverno), a tarefa de avaliar seu comportamento quanto ao desgaste torna-se ainda mais desafiadora aos formuladores e operacionalmente custosa.

É usual utilizar testes em campo que consistem em veículos equipados com pneus do composto em estudo que percorrem um trajeto determinado, sendo medida a perda de massa nos pneus ao final do percurso. Estes testes fornecem a resposta de como cada composto se comportará no mercado, mas necessitam por volta de 6 meses para apresentar resultados, além de requerer elevado custo operacional.

De modo a agilizar a obtenção de dados do desgaste foram desenvolvidos testes em laboratório para acelerar a obtenção de respostas em condições controladas, alguns equipamentos estão inclusive normalizados, mas apresentam uma severidade muito elevada, diferentemente do que ocorre com os pneus rodando sobre pavimento de estradas.

Infelizmente uma constatação freqüente no planejamento de ensaios acelerados é a de tentar reproduzir os movimentos e as condições de solicitações ocorridos na utilização dos materiais a serem avaliados. Os ensaios realizados nestas condições, via de regra, não reduzem o tempo de ensaio. Assim, para acelerar o ensaio, normalmente utilizam variáveis experimentais muito maiores do que o real, como por exemplo a carga de ensaio, a velocidade ou a abrasividade do contra-corpo. Resultados obtidos nestes ensaios nem sempre apresentam correlação com os dos sistemas reais. A correlação só é possível quando os fenômenos observados são iguais isto é, o mesmo mecanismo de desgaste. Se o mecanismo não for o mesmo e apresentar correlação nos resultados terá sido uma mera coincidência.

Como os ensaios em laboratório não conseguem reproduzir os mecanismos de desgaste observados nos pneus de veículos rodando sobre o pavimento das rodovias, por intermédio de parceria científica e tecnológica entre a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a Pirelli Pneus foi desenvolvido pelo Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS da USP um equipamento de teste que utiliza como contra-corpo amostras de pavimento retiradas das rodovias. Além disso, o equipamento é capaz de controlar as condições de carregamento dos pneus, e principalmente capaz de reproduzir os mecanismos responsáveis pelo desgaste. A parceria entre empresa e universidade tornou possível o projeto e a construção deste equipamento através de Projetos de Iniciação Científica e Projetos de Formatura.

A primeira parte deste trabalho consiste na validação dos resultados da máquina de testes, comparando seus resultados com os obtidos em testes de campo para 4 diferentes compostos.

Para viabilizar a comparação foi necessário constatar a reprodução do mecanismo de desgaste encontrado em pneus e a relevância estatística dos resultados de campo e de laboratório. Alem disso, tornou-se necessário normalizar os resultados de modo a permitir a comparação entre um teste de campo, que dura por volta de 6 meses e percorre o equivalente a 60 000 km e um teste de laboratório, realizado em 1 mês, percorrendo uma distância de aproximadamente 50 km.

Os resultados apresentados validam a máquina de desgaste, mostrando que este equipamento é capaz de reproduzir o mecanismo de desgaste encontrado em pneus (ondas de Schallamach), simulando as condições de campo e classificando os compostos testados em laboratório de modo semelhante ao obtido nos testes em campo

A parte final deste trabalho apresenta a análise do desgaste de composto de borracha em função de 4 diferentes tipos de pavimentos encontrados em rodovias brasileiras. Estes pavimentos apresentam classificações distintas em função de suas micro e macrotexturas.

Coerentemente com a literatura pesquisada, os resultados mostram que o desgaste é diretamente proporcional à microtextura do contra-corpo, o pavimento de maior microtextura proporcionou o dobro do desgaste encontrado no pavimento com a menor microtextura.

Em um pavimento em boas condições de conservação (ausência de buracos e irregularidades) a sua microtextura terá influência significativa no desempenho dos compostos de borracha utilizados na banda de rodagem dos pneus automotivos

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Componentes do Pneu

De acordo com GENT (2005), o pneu é constituído em sua maior parte por compostos de borracha, cujo ingrediente básico são os elastômeros, constituídos por cadeias poliméricas entrelaçadas. Os elastômeros são os materiais responsáveis pelas características físicas de elasticidade, flexibilidade e impermeabilidade ao ar e à água.

O comportamento dos compostos de borracha depende do ambiente e das condições operacionais, que irão modificar as propriedades físicas ao longo do tempo e determinar o processo de envelhecimento. Esta influência começa durante o processo de fabricação e irá acompanhar o produto até o final da sua vida útil. Os compostos de borracha são viscoelásticos por natureza, ou seja, seu comportamento depende da frequência de excitação e da temperatura. Por outro lado, quando ciclicamente excitados, os compostos de borracha irão gerar calor, que pode modificar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Existem dois tipos estruturais de pneus, os diagonais ou convencionais e os radiais. Os primeiros possuem carcaça formada por camadas de tecidos dispostas em ângulo, já no segundo tipo a estrutura é composta por camadas de tecidos ou fios metálicos alinhadas radialmente e envolvidas por cinturas, geralmente metálicas.

A Figura 1 apresenta esquematicamente estes dois tipos estruturais de pneus.



Figura 1: Tipo estrutural de pneu diagonal e radial, SAKAI (2001)

De acordo com SAKAI (2001), comparado com o pneu diagonal, o pneu radial possui vantagens, tais como a redução de perdas por histerese devido à deformações menores que implicam em maior economia de combustível, além de apresentar boa durabilidade, menor desgaste e boa dirigibilidade, desenvolve maiores forças laterais e respostas mais precisas aos comandos do volante.





Figura 2: Componentes do pneu radial, GENT (2005).

Cada componente do pneu possui uma função mecânica específica, descrita segundo GENT (2005) a seguir.

- Liner: É uma fina camada localizada no interior de pneus sem câmara de ar. Seu composto é especialmente formulado para apresentar baixa permeabilidade a passagem de ar.
- Friso: É uma estrutura formada por fios metálicos geralmente recobertos por composto de borracha. Sua função é a ancoragem do pneu inflado na roda.
- **Tela:** São camadas formadas por um tecido de reforço inserido em uma matriz de borracha que envolve o friso radialmente. Proporciona a estabilidade geométrica necessária para manter a pressão interna, suporta a carga e impactos laterais.
- Lista anti abrasiva: É um composto de borracha que se localiza entre a roda e a tela para proporcionar resistência ao desgaste do pneu contra a roda e impedir a passagem de ar sob qualquer condição operacional.
- Enchimento do Talão: É um composto de borracha posicionado em cima do friso com a função de preencher o vazio existente na virada da lona e aumentar a rigidez à deformações laterais.
- Flanco: O composto de borracha do flanco serve para proteger a tela de abrasão, impacto e fadiga por flexão. O flanco também apresenta tratamentos decorativos como faixas brancas e texto de identificação. A sua formulação visa resistir a trincas causadas por agentes nocivos do ambiente como ozônio, oxigênio e raios ultravioleta.
- **Cintura Metálica:** Duas cinturas metálicas são depositadas com ângulos opostos no topo da tela, abaixo da região da rodagem. Elas restringem a expansão das telas, estabilizam a área de rodagem e proporcionam resistência ao impacto e perfurações.
- Lista separadora: Pequena inserção de composto resistente à fadiga, localizada entre as cinturas metálicas, próxima à borda da segunda

cintura. Seu objetivo é a redução do cisalhamento na borda da cintura quando o pneu rola e deflete, aumentando a vida à fadiga.

- **Inserto do ombro:** Pequena faixa de borracha posicionada entre a tela e a borda da primeira cintura metálica, isolando o contato entre estes componentes e minimizando as concentrações de tensão nessa região.
- **Nylon:** Camadas de nylon depositadas circunferencialmente sobre o pacote de cinturas metálicas com o objetivo de impedir a expansão devida a forças centrífugas, provenientes de altas velocidades operacionais do pneu.
- **Folheta:** Fina camada de composto de borracha posicionada abaixo da rodagem com o objetivo de aumentar a adesão com o pacote de cinturas durante a montagem do pneu, além de cobrir as bordas cortadas das cinturas metálicas, minimizando a formação de trincas.
- Banda de Rodagem: É o componente que sofre a interação com o pavimento e fornece a aderência necessária para as manobras. Seu composto é especialmente formulado para proporcionar equilíbrio entre desgaste, tração, dirigibilidade e resistência ao rolamento.

Um desenho é moldado na banda de rodagem durante a vulcanização. Este desenho é projetado para proporcionar desgaste uniforme, desviar água da superfície de contato e minimizar o ruído em uma variedade de pavimentos.

2.2 Polímeros

Polímero é uma palavra de origem grega que significa "muitas partes", estes materiais possuem moléculas longas, constituídas de diversas unidades de repetição, os monômeros.

Dentre os polímeros existem os elastômeros, que são o principal componente dos compostos de borracha, constituídos por borracha natural ou sintética.

Segundo GENT (2005), os elastômeros são capazes de suportar elevadas deformações elásticas. Esta propriedade única é derivada de uma estrutura molecular particular: longa, flexível, com moléculas ramificadas que são química ou fisicamente ligadas umas às outras em intervalos irregulares e que possuem energia térmica maior que sua energia de atratividade intermolecular.

Nas borrachas as cadeias moleculares formam uma rede tri-dimensional livre na qual as cadeias mudam de forma e deslizam entre si com relativa facilidade devido à movimentação térmica, exceto nos pontos de ligação. Estes pontos são formados por uniões químicas entre moléculas, através de ligações cruzadas. Quando a ligação cruzada é através de átomos de enxofre diz-se que a borracha está vulcanizada. Nas borrachas não vulcanizadas, os encadeamentos entre moléculas atuam como ligações cruzadas temporárias. Estas uniões eventualmente se desfazem escorregamento com 0 intermolecular, permitindo que o material escoe como um fluido viscoso. A Figura 3 apresenta esquema das cadeias moleculares da borracha e suas ligações.



Figura 3: Cadeias moleculares da borracha e suas ligações, (Modificado de HEISLER, 2002)

A elasticidade dos compostos de borracha ocorre pelo retorno das cadeias moleculares ao seu estado não deformado inicial em contrapartida à conformação alongada, menos provável, imposta pela deformação. As borrachas respondem a uma deformação imposta através de um fluxo interno ou rearranjo dos segmentos das cadeias. No entanto, os movimentos moleculares acontecem em uma taxa que depende da energia térmica disponível para superar as forças resistivas, as quais impedem o movimento relativo entre os segmentos das cadeias. Estas forças resistivas são devidas a

barreiras internas e externas à mudança de conformação molecular. Elas têm o efeito de uma viscosidade interna que retarda a obtenção da conformação de equilíbrio.

Quando a taxa de deformação exige que as cadeias se movam mais rápido do que sua mobilidade natural, a resistência à deformação aumenta e a borracha torna-se mais rígida. Quando a taxa de deformação é inferior à taxa do movimento molecular, a resistência viscosa à deformação é pequena. Esta elasticidade dependente da frequência de excitação e da temperatura das borrachas é denominada viscoelasticidade.

2.2.1 Propriedades Dinâmicas

De acordo com GENT (2005), as características viscoelásticas das borrachas são frequentemente medidas em testes de vibração forçada. Quando uma força senoidal é aplicada em um material viscoelástico, a viscosidade do material ocasiona um atraso da deformação em relação à tensão, ilustrada na Figura 4, onde ω é a frequência e t o tempo. Este atraso de fase é indicativo da perda de energia mecânica em cada ciclo e esta perda é convertida em geração de calor na borracha.



Figura 4: Atraso entre tensão e deformação para material viscoelástico

O módulo dinâmico do material é definido como um número complexo no qual a parte real é a parcela do componente de tensão em fase com a deformação e sua parte imaginária é a parcela do componente de tensão defasado de 90° em relação à deformação. Este último componente é responsável pelas perdas de energia.

A relação é expressa por:

$$E^* = E' + iE''$$
 [2.1]

Na qual E^{*} é o módulo complexo total. A componente real E' é chamada de módulo de armazenagem ou elástico e E" é o módulo de perda ou inelástico.

Para pequenas deformações E' é usado para denotar o módulo de Young. O módulo de cisalhamento G obedece ao mesmo comportamento.

A tangente do ângulo de defasagem da deformação em função da tensão é dada por:

$$Tan\delta = \frac{E''}{E'}$$
[2.2]

Tan δ é um parâmetro básico para expressar as perdas de energia relativas à energia armazenada. As perdas ocasionadas em várias metodologias de teste dinâmico, como por exemplo rebote e decaimento de vibrações livres podem ser expressas em termos de Tan δ .

A Figura 5 mostra as várias relações para E*, E' e E" e ângulo de fase δ . Estas relações são dadas em termos de tensão σ e deformação ε e seus valores de amplitude máxima σ_0 e ε_0 .



Figura 5: Ciclo de histerese, relações entre módulos de armazenagem, perda e ângulo de fase, GENT (2005)

2.3 Formulação de Compostos de Borracha para Pneus

A formulação de compostos de borracha inclui a seleção de ingredientes adequados para obter as propriedades necessárias na utilização final do composto.

Uma vez que a interação dos diferentes ingredientes nas propriedades do produto é altamente não linear, boa parte deste conhecimento é adquirida através de experiência, tentativas e erros. Muitas vezes é preciso conciliar requisitos conflitantes, como no caso da banda de rodagem de pneus, nos quais é necessário ter boa resistência ao desgaste e minimizar o consumo de combustível.

Entre os principais componentes utilizados na formulação pode-se citar

- Polímero (borracha natural ou sintética);
- Cargas reforçantes;
- Sistema protetivo;
- Sistema vulcanizante (apresentado no tópico 2.4 Vulcanização).

É conveniente antes de prosseguir definir alguns termos que serão utilizados para descrever os componentes da formulação.

phr: unidade de medida usada em formulação de compostos de borracha que se refere à quantidade de determinado composto em relação à quantidade total de borracha utilizada, definida em 100 partes de borracha ("**p**arts per **h**undred **r**ubber")

Resiliência: é a capacidade de um material sólido de retornar as suas dimensões originais após ter sido deformado pela ação de uma força. Um material de elevada resiliência proporciona pouca aderência com a pista.

Plasticidade: é a capacidade de um material sólido de deformar, sem retornar ao seu formato original, após ser removida a força aplicada. Um material de elevada plasticidade proporciona boa aderência com a pista.

Histerese: é o atraso na resposta de um material deformado em voltar ao seu formato original, de modo que parte da energia utilizada na deformação não será restituída antes do início do próximo ciclo de deformação. Com a continuidade do ciclo de eventos, cada vez mais energia será absorvida pelo material, ocasionando elevação de sua temperatura. Para efetiva aderência do pneu com a pista é necessário um material com elevada histerese.

Resistência à Fadiga: é a capacidade da estrutura do pneu em resistir aos efeitos de flexões cíclicas sem deterioração de suas propriedades mecânicas.

2.3.1 Borracha Natural (NR)

Segundo HEISLER (2002), a borracha natural tem boa resistência ao desgaste e excelente resistência ao rasgamento. Apresenta boa aderência em pista seca mas mostra comportamento regular em pista molhada. Sua geração interna de calor é reduzida mas apresenta elevada permeabilidade a gases e baixa resistência ao envelhecimento e deterioração por ozônio. Por muito tempo flancos e bandas de rodagem de pneus foram fabricados com borracha natural, atualmente estes componentes são formulados em conjunto com borrachas sintéticas para otimizar suas propriedades

2.3.2 Borracha Sintética

De acordo com HEISLER (2002), dentre as borrachas sintéticas utilizadas na fabricação de pneus pode-se citar:

- Borracha de Estireno Butadieno (SBR)
- Borracha de Poli Butadieno (BR)
- Borracha de Poli Isopreno (IR)

2.3.2.1 Borracha de Estireno Butadieno (SBR)

Segundo HEISLER (2002), é provavelmente a borracha sintética mais utilizada pela indústria de pneus. Forma ligações muito fortes com a estrutura têxtil (lonas e se for o caso cinturas), apresenta ótima resistência ao desgaste mas pouca resistência ao rasgamento em comparação com a borracha natural. Tem como características elevada histerese e baixa resiliência, propriedades que levam à sua excelente aderência na pista, especialmente em superfícies molhadas.

Devido a sua elevada geração interna de calor, SBR preferencialmente se restringe à banda de rodagem.

2.3.2.2 Borracha de Poli Butadieno (BR)

De acordo com HEISLER (2002), é um composto com excelente resistência ao desgaste e permanece estável com mudanças de temperatura. Apresenta elevada resiliência, ou seja, reduzidos níveis de histerese. É um composto que se combinado com SBR nas proporções ideais reduz levemente a aderência em pista molhada ao passo que melhora consideravelmente a resistência ao desgaste. Devido a sua elevada resiliência, se for combinado em grandes proporções pode piorar muito a aderência em pista molhada. Caro para se produzir, geralmente é usado em conjunto com SBR na proporção de 15 até 50%

2.3.2.3 Borracha de Poli Isopreno (IR)

Segundo HEISLER (2002), este composto apresenta características similares à borracha natural, com melhoria na resistência ao desgaste e em particular ao
rasgamento, com a vantagem de apresentar reduzida geração interna de calor sob condições normais de flexão do pneu. Estas propriedades tornam este composto atrativo quando combinado com NR e SBR, de modo a produzir bandas de rodagem com elevada resistência à abrasão.

De acordo com CIULLO (1999), as características que diferenciam o IR da NR têm origem na sua síntese mais controlada, de modo que não contenha as proteínas e ácidos graxos presentes na NR, sendo mais fácil de processar e apresentando vulcanização mais uniforme.

A Figura 6 mostra as principais características dos compostos de borracha apresentados.



Figura 6: Principais características dos compostos de borracha apresentados

2.3.3 Cargas Reforçantes

Segundo a Norma ISO 1382:1996 a carga é um "ingrediente de composição sólida, normalmente adicionado, em quantidades relativas grandes, às composições de borracha ou de látex por razões técnicas ou econômicas".

A utilização de uma carga em um composto depende das propriedades exigidas, que entre outras podem ser aumento de dureza, rigidez, resistência à abrasão ou redução de custo. As cargas destinadas a melhorar propriedades mecânicas são denominadas reforçantes.

As cargas devem ser utilizadas com cautela pois influenciam na viscosidade dos compostos de borracha, de um modo geral quanto maior o volume de carga maior será a viscosidade, ocasionando problemas de produção.

Dentre as cargas reforçantes pode-se citar:

- Negro de fumo (NF)
- Sílica

2.3.3.1 Negro de Fumo (NF)

Segundo a Norma ISO 1382:1996, os negros de fumo são materiais essencialmente constituídos por carbono elementar sob forma de partículas aproximadamente esféricas, de diâmetro máximo inferior a 1µm, aglutinadas em agregados. São produzidos através da combustão parcial ou da decomposição térmica de hidrocarbonetos líquidos ou gasosos. A maioria dos negros de fumo é produzida pelo processo de fornalha. A Figura 7 mostra representação de agregado de negro de fumo.



Figura 7: Representação de agregado de negro de fumo

De acordo com MARK (2005) e RODGERS (2004), entre os parâmetros que caracterizam o NF pode-se citar a área superficial e a estrutura. Um aumento na área superficial do NF basicamente melhora a resistência ao desgaste do composto de borracha. No entanto, valores muito elevados tendem a diminuir esta propriedade, vide Figura 8.



Figura 8: Resistência ao desgaste em função da área superficial do negro de fumo, MARK (2005)

Segundo MARK (2005) de um modo geral um aumento na estrutura do NF irá resultar em melhoria na resistência à fadiga e na propagação de trincas do composto. A diminuição no tamanho da partícula resulta em melhoria na resistência à abrasão e ao rasgamento, diminui a resiliência e aumenta a histerese e a geração interna de calor do composto.

A influência dos níveis de NF da formulação nas propriedades mecânicas do composto de borracha é apresentada na Figura 9. Observa-se que o aumento do nível de NF eleva a geração interna de calor, a dureza, a aderência em pista molhada e a resistência ao rolamento de pneus. No entanto a resistência ao desgaste da banda de rodagem, a resistência à tração e a processabilidade apresentam um valor máximo a partir do qual suas propriedades começam a deteriorar.



Figura 9: Propriedades mecânicas do composto de borracha em função do nível de negro de fumo na formulação. MARK (2005)

2.3.3.2 Sílica

De acordo com MARK (2005) e RODGERS (2004), o uso de sílica em compostos de borracha apresenta duas principais vantagens em relação ao NF:

- Redução na geração interna de calor, quando usada para substituir parte do NF da formulação;
- Melhoria na resistência ao rasgamento, ao corte e ao picotamento

Segundo MARK (2005), quando comparadas a NF de mesmo tamanho de partícula, as sílicas apresentam nível de reforço inferior ao composto de borracha, sendo relatado que sua adição em elevados níveis a composto da banda de rodagem apesar de reduzir histerese e resistência ao rasgamento também reduz resistência ao desgaste.

A Figura 10 pode ser utilizada para comparar as características da sílica em relação ao negro-de-fumo na formulação da banda de rodagem



Figura 10: Comparação entre características de sílica e negro-de-fumo na formulação da banda de rodagem

2.3.4 Sistema Protetivo

De acordo com MORTON (1999), todos os compostos de borracha são afetados por processos de envelhecimento que levam a perda de suas propriedades mecânicas. Este processo é causado principalmente pela cisão de cadeias moleculares, de ligações cruzadas ou alguma outra alteração nas cadeias poliméricas.

O sistema protetivo deve ser formulado de modo a responder aos agentes causadores do envelhecimento, que são entre outros ozônio, oxigênio, calor e radiação ionizante (particularmente raios ultra violeta).

Os protetivos podem ser químicos ou físicos, sendo que os primeiros apresentam-se em 3 tipos principais:

- Aminas secundárias,
- Fenóis e
- Fosfitos

Geralmente as aminas tendem a manchar e são usadas em aplicações nas quais a coloração não seja um fator importante. Caso contrário os fenóis podem utilizados pois tem característica não manchante. Os fosfitos são usados principalmente com SBR.

Os protetivos físicos podem ser usados em aplicações nas quais pouco ou nenhum movimento é envolvido e se constituem em ceras protetivas, que migram para a superfície da estrutura de borracha, formando uma barreira contra a ação do oxigênio e ozônio, entre outros.

2.4 Vulcanização

Após a formulação e o processamento, um elastômero consiste em um líquido de elevado peso molecular, com elevada viscosidade, baixa elasticidade e resistência. Suas moléculas estão emaranhadas, mas podem facilmente se desentrelaçar sob a ação de uma força e escoar como um fluido viscoso.

A vulcanização é um processo no qual a estrutura química da elastômero é alterada através da introdução de ligações cruzadas entre suas cadeias poliméricas adjacentes; segundo GENT (2001) este processo transforma o composto de um líquido viscoso para um sólido elástico e resistente.

A Figura 11 apresenta comparativo entre as cadeias moleculares de uma borracha não vulcanizada e outra vulcanizada, aonde as ligações cruzadas correspondem aos círculos pretos.



Figura 11: Cadeias moleculares da borracha: A) Não vulcanizada; B) Vulcanizada. (Modificado de MARK, 2005)

De acordo com DATTA (2001), o primeiro método comercial de vulcanização é atribuído a Charles Goodyear em 1839, o processo constituía em aquecer borracha natural juntamente com enxofre, resultando em melhoria de suas

propriedades físicas. No entanto era necessário um longo tempo para o término da reação (mais de 5 horas).

De acordo com CIULLO (1999), a vulcanização aumenta a rigidez, a dureza, a resistência à tração e ao desgaste. Por outro lado diminui o alongamento, a histerese (geração interna de calor), deformação permanente e solubilidade.

A Figura 12 apresenta, esquematicamente, as propriedades mecânicas de elastômero vulcanizado em função da densidade de suas ligações cruzadas. Observa-se que a resistência ao rasgamento e a resistência à tração alcançam ponto de máximo, a partir do qual estas propriedades começam a deteriorar. É importante ressaltar que estas propriedades não dependem exclusivamente da vulcanização, mas dentre outros fatores, também são influenciadas pelo tipo de elastômero e pelo tipo e quantidade de carga reforçante.



Densidade de Ligações Cruzadas

Figura 12: Propriedades mecânicas de elastômero vulcanizado em função da densidade de suas ligações cruzadas. MARK (2005)

Um sistema de vulcanização contém agentes de vulcanização (enxofre, óxidos metálicos, compostos difuncionais e peróxidos) e, se necessário, acelerantes, ativadores, etc, usados para produzir as características de vulcanização

necessárias que resultem nas propriedades desejadas do componente vulcanizado. Neste trabalho será abordado o sistema de vulcanização a base de enxofre.

O enxofre é o agente vulcanizante mais difundido, sendo usado em 2 modos, solúvel e insolúvel. De acordo com GENT (2001), o enxofre insolúvel pode ser usado em compostos que contenham elevados níveis de enxofre para prevenir a sua migração para a superfície. Este comportamento pode ocorrer quando grandes quantidades de enxofre solúvel são utilizadas pois durante o processamento do composto são atingidas altas temperaturas que proporcionam elevada solubilidade. No entanto, durante o resfriamento a solubilidade diminui e ao atingir seu limite o enxofre excedente migra para a superfície, e lá se cristaliza, reduzindo a adesão entre compostos de borracha, que é uma propriedade necessária para a produção de pneus.

O enxofre insolúvel não migra para a superfície pois ele dispersa no composto na forma de partículas discretas que não podem ser facilmente difundidas através da borracha.

Nos primórdios da vulcanização era usado enxofre elementar em um processo que necessitava de 5 horas na temperatura de 140°C para ser completado. Segundo MARK (2005) a adição de óxido de zinco reduziu este tempo para 3 horas, que ainda não era o suficiente para propósitos comerciais. Desde então o desenvolvimento de acelerantes contribuiu para a redução do tempo de processo até alcançar o intervalo atual de 1 a 3 minutos.

De acordo com DATTA (2001), o andamento de um processo de vulcanização pode ser analisado por uma curva reométrica, obtida através do reômetro de disco oscilante, mostrado esquematicamente na Figura 13, no qual a borracha é inserida em uma câmara aquecida e a vulcanização é medida pela variação no torque (que é proporcional ao módulo elástico da borracha) necessária para manter uma determinada amplitude de oscilação do disco para uma dada temperatura.



Figura 13: Esquema de reômetro de disco oscilante. (Modificado de MARK, 2005) A Figura 14 apresenta uma curva reométrica esquemática típica de um composto de borracha.



Figura 14: Curva reométrica de um composto de borracha. DATTA (2001)

De acordo com GENT (2001), assim que a borracha começa a aquecer sua viscosidade diminui, resultando em diminuição do torque. Ao longo do processo o composto de borracha começa a vulcanizar, tornando-se um sólido elástico, e seu torque aumenta. Podem coexistir cisões das cadeias moleculares, mas se a formação de ligações cruzadas for predominante, o torque continua a aumentar até atingir um patamar, que indica que a vulcanização do composto está completa.

2.5 Caracterização do Pavimento

Em engenharia de transporte o pavimento é a camada constituída por um ou mais materiais que se coloca sobre o terreno de modo a aumentar sua resistência e garantir a mobilidade de pessoas ou veículos.

Uma das primeiras formas de pavimentação foi a calçada romana, construída em várias camadas de pedras, denominada de macadame, que permitiam estabilidade e resistência para a via, proporcionando que algumas delas ainda estejam preservadas nos dias atuais. A Figura 15 apresenta pavimento de via urbana em Pompéia, Itália.



Figura 15: Via urbana em Pompéia, Itália. BERNUCCI et al. (2006)

Segundo BALBO (2007), a primeira estrada pavimentada brasileira foi a Calçada de Lorena, permitindo acesso do Planalto Paulista ao porto de Santos. Idealizada no final do século XVIII pelo governador da capitania de São Paulo, Bernardo José de Lorena e supervisionada por engenheiros da Escola de Fortificações de Lisboa. A Figura 16 mostra vista da Calçada de Lorena.



A) B)
 Figura 16: Primeira estrada pavimentada brasileira, a Calçada de Lorena. A) Visão parcial. B) Detalhe do pavimento. ZUCATO (2009)

2.5.1 Tipos de Revestimentos Asfálticos

Segundo APS (2006), no Brasil a maioria dos pavimentos utiliza os revestimentos asfálticos, que podem ser divididos em:

- Usinados a quente ou a frio,
- Tratamentos superficiais e
- Microrrevestimentos a frio e lamas asfálticas
- Usinados a quente ou a frio: utilizam geralmente usinas estacionárias para a produção e equipamentos específicos para sua distribuição e compressão;
- Tratamentos superficiais: são preparados na própria pista e constituídos de camadas alternadas de ligante asfáltico e de agregados, a aplicação é feita por veículos específicos;
- Microrrevestimentos a frio e lamas asfálticas: são misturas produzidas por usinas móveis, acopladas em veículo que também executa a distribuição.

2.5.2 Graduação de Misturas Asfálticas Usinadas

As misturas asfálticas usinadas podem ser subdivididas pelo padrão de sua distribuição granulométrica e a seguir serão apresentados 2 dos tipos mais usuais destas misturas.

2.5.2.1 Graduação densa e bem graduada

Distribuição granulométrica contínua de forma a proporcionar um esqueleto mineral, com poucos vazios, uma vez que os agregados de dimensões menores preenchem os espaços vazios. São graduações de elevada resistência ao cisalhamento graças ao arranjo e entrosamento dos grãos. Pode-se citar como exemplo o *concreto asfáltico* (CA), também denominado de *concreto betuminoso usinado a quente* (CBUQ), que de acordo com APS (2006), é o tipo de mistura usinada mais utilizada no Brasil. A Figura 17 apresenta o aspecto de CBUQ.



Figura 17: Amostra de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). A) Seção transversal. B) Aspecto da superfície

2.5.2.2 Graduação descontínua

Distribuição granulométrica com maior proporção dos agregados de maiores dimensões, completados por certa quantidade de finos com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente por maior número de contatos entre os agregados graúdos. Pode-se citar como exemplo a *matriz pétrea asfáltica* (*Stone Matrix Asphalt* – SMA), que segundo APS (2006), foi introduzida no Brasil no ano 2000 no autódromo de Interlagos "José Carlos Pace". De acordo com BALBO (2006), a textura superficial resultante é mais rugosa e durante períodos chuvosos evita a formação de finas lâminas de água, favorecendo aderência entre pneu e pavimento. A Figura 18 apresenta aspecto de SMA.



Figura 18: Amostra de matriz pétrea asfáltica (*Stone Matrix Asphalt* – SMA). A) Seção transversal. B) Aspecto da superfície

2.5.3 Tratamentos Superficiais Asfálticos

De acordo com APS (2006), os tratamentos superficiais são executados por aplicações sucessivas de camada de ligante asfáltico e camada de agregados de dimensões similares. O tratamento pode ser simples, no qual há uma camada de ligante seguida de uma camada de agregados (TSS), ou duplo (TSD), que consiste na aplicação de duas camadas de ligante asfáltico e duas camadas de agregados, sendo a primeira de agregados graúdos e a segunda de agregados miúdos. A Figura 19 apresenta desenho esquemático dos tratamentos superficiais e a Figura 20 apresenta amostra de TSD.



Figura 19: Esquema de tratamentos superficiais asfálticos: A) Simples; B) Duplo. (Modificado de APS, 2006)



Figura 20: Amostra de tratamento superficial duplo (TSD). A) Seção transversal. B) Aspecto da superfície

2.5.4 Microrrevestimento

Segundo APS (2006), o microrrevestimento asfáltico pode ser empregado como camada de selagem inibidora de trincas, impermeabilização, rejuvenescimento ou atuando como camada antiderrapante de pavimentos. Foi introduzido no Brasil no início da década de 1990 e utiliza emulsão asfáltica modificada por polímero. Em geral são feitas aplicações em duas camadas sucessivas para restaurações funcionais. A Figura 21 apresenta o aspecto do microrrevestimento.



Figura 21: Amostra de microrevestimento. A) Seção transversal. B) Aspecto da superfície

2.5.5 Classificação da Textura de Pavimentos

De acordo com BERNUCCI *et al.* (2006) os revestimentos asfálticos modernos constituem um material composto formado por agregados de vários tamanhos e proporções, mantidos unidos por um ligante asfáltico.

A textura dos revestimentos asfálticos é influenciada pela forma e microtextura superficial dos agregados e por sua distribuição granulométrica. O ligante asfáltico tem pouca influência na textura, mas possui participação relativa à resistência à desagregação dos revestimentos, evitando o arrancamento dos agregados. A Figura 22 apresenta esquema de micro e macrotextura de um revestimento asfáltico.





Segundo APS (2006), no congresso da *Permanent International Association of Road Congress* – PIARC, realizado em Bruxelas em 1987, foram definidas três categorias de textura de pavimentos: a microtextura, a macrotextura e a megatextura. Os limites entre os domínios de escala das irregularidades foram definidos através do comprimento de onda (horizontal) e da amplitude (vertical). A Tabela 1 apresenta esta divisão de acordo com a ASTM E-867,1997

Domínio	Intervalo de dimensões		
	Horizontal	Vertical	
	[mm]	[mm]	
Microtextura	0 – 0,5	0 – 0,2	
Macrotextura	0,5 – 50	0,2 – 10	
Megatextura	50 - 500	1 – 50	
Irregularidade	500 - 5.000	1 – 200	

Tabela 1: Classificação da textura (ASTM E-867, 1997)

De acordo com BERNUCCI *et al.* (2006), a avaliação da textura da superfície relativa à sua aderência é feita através da microtextura e da macrotextura. São desconsideradas a megatextura e a irregularidade, apesar destas interferirem na dinâmica veicular e no contato entre pneu e pavimento, afetando a estabilidade direcional e a aderência em pistas molhadas

A microtextura depende da aspereza dos agregados da camada superficial e pode ser classificada por rugosa ou lisa.

A macrotextura depende da graduação da mistura utilizada na camada de rolamento e pode ser classificada por aberta ou fechada.

A Tabela 2 apresenta as 4 combinações de microtextura e macrotextura que resultam na classificação da textura de um pavimento

Superfície	Microtextura	Macrotextura	
Thomashall	Rugosa	Aberta	
TITTTTI		Fechada	
Month Mille	Lisa	Aberta	
11111111		Fechada	

Tabela 2: Classificação de textura de um pavimento (SHAHIN, 1994)

2.5.6 Métodos de Medição de Textura em Pavimentos

2.5.6.1 Medidas de Macrotextura em Pavimentos –Método da Mancha de Areia

A macrotextura pode ser avaliada pelo método da *Mancha de Areia* (MPD – *Mean Profile Depth*). Este ensaio é usado para determinar a profundidade de altura média de um volume de areia em superfícies de pavimentos, conforme a norma ASTM E 965-96 (2001). Consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume conhecido de areia preparada de modo que a área final seja aproximadamente circular. Através da equação 2.3 e do diâmetro médio Dm é obtida a altura média Hm. A Figura 23 mostra o teste da Mancha de Areia.

$$H_m = \frac{V.4}{D_m^2.\pi}$$
[2.3]

Onde:

 $V = 25000 \pm 150 \text{ (mm}^3$);

Dm = diâmetro médio da mancha de areia (mm);

Hm = altura média da mancha de areia (mm).



Figura 23: Teste de mancha de areia – A) ASTM E-965-96 – B) procedimento realizado pelo LTP-EPUSP

2.5.6.2 Medidas de Microtextura em Pavimentos – Método do Pêndulo Britânico

É um equipamento portátil cuja utilização é especificada pelo método da ASTM E-303-93 (1998). Seu funcionamento baseia-se na medição da perda de energia sofrida pela sapata do pêndulo ao deslizar seu contra-corpo de borracha em um pavimento molhado. Esta sapata é posicionada na extremidade livre do pêndulo. O valor obtido é expresso em *BPN* (*British Pendulum Number*) ou *SRT* (*Skid Resistent Test*). A Figura 24 apresenta os principais componentes do Pêndulo Britânico



Figura 24: A) Principais componentes do Pêndulo Britânico. (MAIN ROADS WESTERN AUSTRALIA, 2009). B) Equipamento do LTP-EPUSP

2.5.7 Influência da Textura dos Pavimentos no Desgaste dos Pneus

São encontradas poucas referências sobre o desgaste dos pneus em função da textura do pavimento. Uma importante contribuição é o trabalho de LOWNE (1971), no qual o desgaste da banda de rodagem de pneus de veículos de passeio é medido através de testes com diferentes pavimentos. Foram realizados 2 tipos de ensaio:

- Teste de desgaste acelerado em equipamento especial que permitia 20° de ângulo de deriva (o ângulo de deriva é apresentado no tópico 2.6 Principais Ângulos Atuantes nos Pneus)
- Teste de desgaste em veículos comuns fazendo percurso em formato de número 8, resultando em ângulos de deriva elevados

Através destes testes foi concluído que a microtextura é o principal fator para a determinação do desgaste da banda de rodagem do pneu, tendo a macrotextura pequena participação, o aumento da macrotextura resultou em pequeno aumento no desgaste.

Posteriormente VEITH (1987) e LE MAITRE *et al.* (1998) também abordaram o desgaste do pneu em função da textura do pavimento. Concluíram que a microtextura é o fator mais significativo para o desgaste e, além disso, indicam que a abrasividade do pavimento é influenciada pelas condições climáticas.

Ao longo do tempo a microtextura do pavimento pode diminuir devido ao polimento da superfície dos agregados mas, no entanto, é observado que a abrasividade do pavimento aumenta após períodos de chuva. A Figura 25 apresenta a influência da incidência de chuvas na abrasividade de um pavimento obtida por VEITH (1986) em função da temperatura superficial do pneu. Os pontos identificados por R representam teste realizado um dia após chuva moderada (5 mm) e o ponto indicado por HR representa teste realizado um dia após chuva forte (25 mm). Estes pontos mostram aumento na taxa de desgaste proporcionado pelo aumento na microtextura do pavimento ocasionado pela ação das chuvas.



Figura 25: Taxa de desgaste normalizado de pavimento seco em função da temperatura superficial de pneu com SBR na formulação da rodagem. R representa teste realizado um dia após chuva moderada (5 mm). HR representa teste realizado um dia após chuva forte (25 mm). VEITH (1986)

2.6 Principais Ângulos Atuantes nos Pneus

Este tópico tem o propósito de apresentar os principais ângulos aos quais o pneu está submetido durante as manobras de um veículo. Estes ângulos serão utilizados para melhor entendimento das características da máquina de desgaste de compostos de borracha criada numa parceria entre o LFS da Universidade de São Paulo e a Pirelli Pneus Ltda.

2.6.1 Ângulo de Deriva

De acordo com GARRETT *et al.* (2001), o ângulo de deriva é definido como aquele entre a direção do pneu e a direção da trajetória do veículo. O ângulo de deriva está associado ao aumento de força lateral, sendo o responsável pela capacidade do pneu em desenvolver trajetórias curvilíneas.

A Figura 26 apresenta uma representação esquemática de pneu sob a ação de ângulo de deriva.



Figura 26: representação esquemática de vista superior de pneu sob a ação de ângulo de deriva. GARRETT *et al.* (2001)

GOUGH (*apud* VEITH 1987) mostrou que manobras em curva são as principais responsáveis para o desgaste da banda de rodagem dos pneus. Desse modo, o estudo da durabilidade dos pneus necessita levar em consideração o ângulo de deriva.

2.6.2 Ângulo de Camber

De acordo com WONG (2001), o ângulo de camber é o ângulo formado entre o plano da roda e o plano perpendicular à pista. Segundo HEISLER (2002), o ângulo de camber é negativo quando o topo da roda se inclina na direção do veículo e positivo quando o topo da roda é inclinado na direção oposta ao veículo.

A Figura 27 apresenta representação esquemática de pneu sob a ação de ângulo de camber.



Figura 27: representação esquemática de pneu sob a ação de ângulo de deriva. (Modificado de WONG, 2001) Analogamente ao ângulo de deriva o ângulo de camber também está associado ao aumento de força lateral. De acordo com GILLESPIE (1992), a força lateral proveniente da cambagem é muito menor do que aquela obtida com ângulo de deriva. Para um pneu diagonal é necessário em torno de 6° de ângulo de camber para obter a força lateral equivalente à alcançada com 1° de ângulo de deriva.

2.6.3 Ângulo de Cáster

Segundo GARRETT *et al.* (2001) o ângulo de cáster tem o objetivo de estabilizar a roda após a realização de manobras, de modo que seu plano se mantenha paralelo ao da direção do movimento

De acordo com HEISLER (2002), a Figura 28 exemplifica a atuação do ângulo de cáster. Ângulos positivos são estabelecidos quando o centro da área de contato do pneu se localiza atrás da projeção do eixo de rotação do plano da roda; esta configuração é encontrada em veículos com tração traseira. Ângulos negativos são obtidos quando o centro da área de contato do pneu se localiza na frente da projeção do eixo de rotação do plano da roda; esta configuração é encontrada o plano da roda; esta configuração é encontrada em veículos com tração do plano da roda; esta configuração é encontrada em veículos com tração do plano da roda; esta configuração é encontrada em veículos com tração do plano da roda; esta configuração é encontrada em veículos com tração dianteira. Um ângulo nulo é obtido quando o centro da área de contato do pneu coincide com a projeção do eixo de rotação do plano da roda, neste caso as rodas dianteiras tornam-se instáveis em uma trajetória retilínea.



Figura 28: Atuação do ângulo de cáster. (Modificado de HEISLER, 2002)

2.7 Atrito e Desgaste na Interface Pneu Pavimento

2.7.1 Atrito

Quando se fala em atrito, a primeira dificuldade é entender corretamente o significado desta palavra. Leonardo da Vinci, em todos os seus trabalhos relacionados com este assunto, fala de esfregamento (*confregazione –* ressalte-se que *da Vinci* não utilizou a palavra *"attrito"* que, também, tem origem no latim e não conceitua claramente o fenômeno). Da Vinci, trata apenas da força requerida para diminuir o movimento [LEONARDO 1]. As obras que tratam dos trabalhos do *da Vinci*, editadas na língua inglesa, falam em atrito (*"friction"*) ou força de atrito [LEONARDO 2]. Cabe ressaltar que há uma distinção muito clara na língua inglesa entre *friction* (atrito) e *rubbing* (esfregamento). Em português existe uma persistente confusão decorrente do

emprego de expressões como "desgaste por atrito" que tentam explicar o desgaste que ocorre devido ao esfregamento, ou deslizamento, entre corpos. Com a distinção entre atrito e esfregamento, seria possível diferenciar o desgaste por deslizamento (ou esfregamento) do atrito no deslizamento (ou no esfregamento). Outras confusões decorrem quando se usa a palavra atrito para transmitir quatro significados distintos: a força de atrito, a energia dissipada na região do contato, o coeficiente de atrito ou o fenômeno atrito. [SINATORA e TANAKA (2007)].

Da Vinci ainda havia constatado a existência do atrito estático e dinâmico, tendo registrado que "a força para iniciar o movimento é maior do que para parar" [LEONARDO 3].

A força de atrito *F* entre dois sólidos em movimento relativo, de modo geral, é independente dos fatores externos e é proporcional somente à força normal *N* entre as superfícies. O resultado desta lei é:

$$F = \mu . N \tag{2.4}$$

Desta, deduz-se que o coeficiente de atrito μ é independente da pressão de contato e da área de contato.

A independência da força de atrito com a área aparente de contato também já havia sido registrado por da Vinci, conforme ilustração da Figura 29.



Figura 29: Ilustração da independência da força de atrito com a área aparente de contato [LEONARDO 4].

Pode-se mostrar ainda, como no trabalho de Coulomb (1785, *apud* BHUSHAN, 2002), que o coeficiente de atrito também é independente da velocidade de escorregamento.

De acordo com BROWN (1996), os compostos de borracha não obedecem às leis clássicas de atrito para os sólidos e seus coeficientes de atrito variam, entre outros fatores, em função da área real de contato, da força normal entre as superfícies e da velocidade de escorregamento. Segundo COSTA (2007) o coeficiente de atrito das borrachas também varia com a temperatura e as particularidades de seu comportamento têm origem em duas das propriedades físicas destes compostos: o baixo módulo elástico e a viscoelasticidade.

O atrito das borrachas apresenta duas contribuições principais, uma parcela devida à adesão no contato entre superfícies e outra relativa à histerese que atua no corpo da borracha (viscoelasticidade). A contribuição da adesão provém de forças de atração fracas (forças de van der Waals) entre a superfície da borracha e o contra-corpo. Em superfícies muito lisas, devido ao baixo módulo elástico dos elastômeros, mesmo quando a força de contato é muito branda, as atrações fracas podem resultar em contato completo na interface entre as superfícies contribuindo para forças de atrito elevadas, como observadas por Schallamach (apud GENT, 2005) onde o coeficiente de atrito atinge um valor elevado, da ordem de 2 ou 3. Por outro lado, no caso de superfícies rugosas, diminui a contribuição da adesão para o atrito devido a menor área real de contato envolvida. Segundo PERSSON (2006), a área de contato real entre o pneu e a superfície de um pavimento rugoso, é tipicamente da ordem de 1 % da área de contato nominal ou aparente. Sob estas condições, Persson acredita que a contribuição devido à histerese deva prevalecer, o que pode explicar a dependência da temperatura na aderência pneu-pavimento.

Ainda segundo PERSSON (2006), quando um bloco sólido de borracha desliza sobre uma superfície rugosa, como por exemplo o pavimento asfáltico, a rugosidade desta superfície vai exercer deformações cíclicas, dependentes do tempo, na superfície da borracha, resultando em dissipação de energia na borracha devido aos efeitos da viscoelasticidade. Esta energia dissipada vai contribuir para o atrito por deslizamento. A maioria das superfícies sólidas possui rugosidade em diferentes escalas, numa geometria que se repete como

no caso dos fractais: existe a rugosidade, a rugosidade da rugosidade, e assim sucessivamente (Figura 30).



Figura 30: Bloco de borracha em contato com sólido rugoso, PERSSON (2006).

De acordo com COSTA (2007), no contato entre pneu e pavimento, o nível de deformação está vinculado ao módulo elástico e dureza do material. A temperatura do pneu e a frequência de excitação são influenciadas pelas condições operacionais do veículo e pela interação do pneu com o pavimento. Como consequência, na formulação do composto da banda de rodagem, devese levar em conta a aplicação e o mercado de utilização. Desse modo a escolha do melhor material torna-se um processo de interação entre engenharia de matérias, projeto de produto e fabricantes de veículos, demandando exaustivos trabalhos em laboratórios e pistas de prova.

Da discussão acima, é possível concluir que o atrito dos pneus depende da textura do pavimento. Não há na literatura informações sobre coeficiente de atrito para os pavimentos brasileiros, principalmente para veículos comerciais, onde devido à tensão de contato maior, atinge valores mais baixos.

2.7.2 Desgaste

Segundo a norma DIN 50320 (1979, apud KONIG, 2007), o desgaste é definido como sendo a perda progressiva de material de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, em função do contato e do movimento relativo de um corpo

sólido contra outro corpo sólido, líquido ou gasoso. Este conjunto de corpos em contato com movimento relativo constitui o tribossistema, que de acordo com ZUM GAHR (1987), é constituído basicamente por 4 elementos:

- Corpo
- Contra-corpo
- Elemento Interfacial ou 3º Corpo
- Ambiente

Neste trabalho, para o caso específico do desgaste entre pneu e pavimento considera-se o tribossistema ilustrado na Figura 31.



Figura 31: Tribossistema do desgaste entre pneu e pavimento, COSTA (2007).

De acordo com a norma DIN 50320 (1979, apud ZUM GAHR, 1987) no processo de desgaste estão envolvidos quatro mecanismos básicos, representados na Figura 32:

- Adesão Formação e ruptura de ligações adesivas na interface das superfícies em contato
- Abrasão remoção de material devido ao arrancamento de partículas

- **Fadiga superficial** Fadiga e formação de trincas na camada limite devido à tensões trativas cíclicas, resultando na separação do material
- Reação Triboquímica Formação de produtos de reação química como o resultado de interações químicas entre os elementos de um tribossistema, iniciada por ação tribológica.



Figura 32: Representação esquemática dos mecanismos básicos de desgaste, ZUM GAHR (1987)

O desgaste reduz drasticamente a eficiência operacional, resultando em mudanças dimensionais ou danos às superfícies de contato que podem ocasionar problemas secundários, tais quais aquecimento, ruído e vibração.

Em determinadas situações não se conhece o mecanismo de desgaste atuante, pois diferentes mecanismos podem atuar simultaneamente, como por exemplo abrasão e reação triboquímica, que dependem da estrutura do tribossistema.

O desgaste de compostos de borracha está relacionado à capacidade destes de resistir às condições abrasivas do meio no qual estão sendo utilizados. Esta característica depende fortemente das suas propriedades viscoelásticas.

2.7.2.1 Desgaste Abrasivo

ZUM GAHR (1987) define o desgaste abrasivo como sendo a remoção de material de uma superfície causada por partículas duras. Tais partículas podem estar entre ou incrustadas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo. Por partícula dura entenda-se um fragmento ou protuberância de material com maior dureza que a superfície contra-atritante.

No contato pneu e pavimento, as partículas que causarão o desgaste abrasivo na superfície da banda de rodagem são compreendidas tanto por protuberâncias do pavimento (macrotextura) quanto por material abrasivo destacado da pista, caracterizando o desgaste a três corpos (vide Figura 33).



Figura 33: Exemplo de desgaste a 2 e a 3 corpos, ZUM GAHR (1987)

O desgaste abrasivo é caracterizado pela formação de sulcos na direção paralela ao deslocamento e remoção de cavacos do material.

2.7.2.2 Deterioração Térmica e Química

Dois tipos de reação podem ocorrer durante o atrito que são responsáveis pelo desgaste:

 Deterioração oxidativa, devida ao aquecimento na zona de contato provocado pelo deslizamento. Deterioração químico-mecânica, devida à ruptura de ligações químicas iniciada durante o cisalhamento.

De acordo com VEITH (1982), sob condições de desgaste de baixa severidade a deterioração química ou mudanças moleculares tornam-se importantes. A magnitude da abrasão permanece pequena, mas os fragmentos gerados são frequentemente pegajosos, formando grandes partículas com comprimento da ordem de grandeza de milímetros. Por exemplo, cis-poli-isopreno que apresenta ruptura molecular sob condições de cisalhamento, desenvolve uma superfície líquida e pegajosa durante a abrasão.

2.7.2.3 Deslizamento e Marcas de Schallamach

Quando a borracha é desgastada através de repetido deslizamento numa mesma direção surge uma configuração de superfície característica, que toma a forma de uma série de cristas que formam 90° em relação à direção de deslizamento, na base das quais ocorre o desgaste, como mostrado na Figura 34. Este tipo de desgaste, característico de elastômeros, é conhecido como marcas de Schallamach, sendo bem diferente da abrasão de materiais duros, nos quais há a formação de longos sulcos, paralelos à direção de deslizamento. Sua característica morfológica é atribuída ao repetido arrancamento da base das cristas. Este processo é influenciado pela tensão de ruptura do material.



Figura 34: Marcas de Schallamach, GENT (2005)

Há a ocorrência de dois processos de desgaste: um em pequena escala de desgaste na base das cristas, que resulta em pequenas partículas de 1 a 5 mm e outro de arrancamento de fragmentos relativamente grandes da ponta das cristas. Apesar de serem em menor número, as partículas maiores geralmente apresentam maior contribuição para a perda de massa.

A Figura 35 apresenta a morfologia do desgaste para dois compostos de borracha natural vulcanizados e reforçados com diferentes níveis de negro de fumo, com contra-corpo de concreto áspero deslizando no sentido de baixo para cima da Figura. O composto B, tem menor nível de NF e por consequência, menor resistência ao desgaste, tanto a altura quanto o espaçamento entre cristas aumentam com o aumento da severidade do desgaste.



Figura 35: Morfologia do desgaste para dois compostos de borracha natural vulcanizados e reforçados com diferentes níveis de negro de fumo. Contra-corpo de concreto áspero. Direção de deslizamento de baixo para cima. A) 45 phr de NF B) 25 phr de NF. SCHALLAMACH (1957)

2.7.3 Máquinas de Desgaste de Borracha em Laboratório

De acordo com BROWN (1996), a consideração mais importante com relação a realização de testes de desgaste em laboratório é que as condições operacionais das máquinas reproduzam os mecanismos de desgaste encontrados na prática. Em caso contrário, a simples comparação entre 2 compostos pode ser inconclusiva.

Nos laboratórios de tribologia das Universidades, como no Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS da Universidade de São Paulo, e das empresas, são executados muitos ensaios de desgaste, alguns utilizando equipamentos já normalizados e bastante difundidos como a abrasão DIN 53516, além de outros ensaios com equipamentos construídos a partir de muita pesquisa e desenvolvimento, que aos poucos tornam-se padrões para a indústria como o "Grosch abrader", mostrado mais adiante.

Segundo COSTA (2007), o ensaio de abrasão DIN 53516, comumente chamado de "Abrasão DIN", tornou-se muito difundido na caracterização do desgaste de elastômeros, devido ao fato de que o desgaste geralmente é associado a uma resistência à abrasão (Figura 36). De acordo com BROWN (1996), seu princípio de funcionamento pode ser ilustrado pela Figura 36A, na qual um corpo-de-prova cilíndrico de borracha é arrastado contra um tambor rotativo que possui em sua superfície material abrasivo, sendo usualmente uma folha de lixa. A pressão de contato e a velocidade são mantidas constantes e a resistência ao desgaste é dada pela perda volumétrica ao final do teste, medida indiretamente através da perda de massa do corpo cilíndrico. Segundo COSTA (2007) a abrasão DIN é um ensaio muito severo quando comparado ao desgaste dos pneus à baixa severidade, por tratar-se de deslizamento contínuo contra uma superfície muito abrasiva, diferentemente do que ocorre com os pneus rodando sobre pavimento de estradas. onde observa-se simultaneamente rolamento com escorregamentos localizados, sendo o mecanismo de desgaste observado em pneus a baixa severidade.



Figura 36: Equipamento para execução do teste de abrasão DIN 53516. A) Princípio de funcionamento. BROWN (1996). B) Visão geral. COSTA (2007)

O pesquisador K. A. GROSCH desenvolveu um equipamento, mostrado na Figura 37, para estudar o desgaste de elastômeros tentando sanar a deficiência do ensaio de abrasão DIN (GROSCH (1997)). Neste equipamento, um corpo-de-prova constituído de uma roda de borracha, com 80 mm de diâmetro gira, pressionada por um braço mecânico, contra um disco abrasivo de *corundum* (óxido de alumínio). Um ângulo de deriva, com relação à trajetória circular, é imposto à roda de borracha, de modo que, ao mesmo tempo em que ela rola contra o disco abrasivo, também está submetida a um escorregamento localizado devido à componente de força lateral, como nos pneus. O equipamento é conhecido como "*Grosch abrader*", e é comercializado como LAT 100 (*Laboratory Abrasion Tester*).



Figura 37: LAT 100 para desgaste de borrachas. A) visão geral B) detalhe da roda de borracha e do disco de *corundum* (óxido de alumínio). COSTA (2007)

De acordo com COSTA (2007), apesar dos avanços obtidos com o "Grosch abrader", até o presente momento, não se conhece nenhum ensaio acelerado em laboratório que consiga simular e avaliar de modo eficaz o desgaste de pneus de transporte a baixa severidade, discernindo de forma eficaz o desempenho dos compostos de borracha. Deve-se ressaltar que o desgaste de pneus não depende somente dos materiais envolvidos, mas também das condições operacionais e ambientais que compõem o tribossistema. No caso do desgaste de pneus o tribossistema é influenciado pelas características do pavimento, pelo veículo, pela reação do motorista, por condições climáticas (temperatura ambiente e quantidade de chuva) e sazonais (verão ou inverno).

Como os ensaios em laboratório não conseguem reproduzir os mecanismos de desgaste observados nos pneus de veículos rodando sobre o pavimento das rodovias, foi desenvolvido pelo *Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS da Universidade de São Paulo* um equipamento de teste que utiliza como contra-corpo amostras de pavimento retiradas das rodovias. Além disso, o equipamento é capaz de controlar as condições de carregamento dos pneus, e principalmente capaz de reproduzir os mecanismos responsáveis pelo desgaste.

No ítem 3.2.2.1 será apresentado o equipamento desenvolvido, sendo seus resultados posteriormente validados através de resultados em campo.

2.8 Análise Estatística dos dados

2.8.1 Planejamento de Experimento e Análise de Variância (ANOVA)

De acordo com BOX *et al.* (1978), a Análise de Variância é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos.

Um tratamento é uma condição imposta ou objeto que se deseja medir ou avaliar em um experimento. Como exemplos de tratamentos podem-se citar: fabricantes de equipamentos, níveis de temperatura, quantidade de lubrificante, compostos de borracha na banda de rodagem de um pneu e diferentes pavimentos.

Os tratamentos que podem ser dispostos em uma ordem, como por exemplo, níveis de temperatura e quantidade de lubrificante, são ditos tratamentos quantitativos. Já os tratamentos que não podem ser dispostos numa ordem, são ditos tratamentos qualitativos, por exemplo, fabricantes de equipamentos, compostos de borracha na banda de rodagem de um pneu e diferentes pavimentos.

2.8.2 Planejamento de Experimentos (Fatorial 2²)

Os ensaios realizados em laboratório foram organizados de acordo com um planejamento fatorial 2² de modo a entender as relações entre os parâmetros da máquina de ensaio.

Uma vez estabelecida a significância dos dados experimentais, deve-se estudar a relação entre os parâmetros da máquina e o desgaste obtido, esta relação é melhor compreendida através de um planejamento fatorial 2²

Inicialmente é necessário especificar os níveis nos quais cada fator será estudado, ou seja, os valores de cada fator usado no planejamento, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros do planejamento fatorial 2^2

Fator	Ângulo de [grau	Carga [kgf]		
Nível	A1	A2	C1	C2

Com o objetivo de estimar o erro experimental serão realizados testes em duplicata e, caso necessário, em triplicata.

É importante organizar os dados na forma da Tabela 4, onde os sinais – (negativo) e + (positivo) representam respectivamente o menor e o maior nível de cada fator.

Tabela 4: Resultados do planejamento fatorial 2²

Teste	Ângulo d [gra	e deriva us]	Ca [k	rga gf]	Taxa de [Desgaste g]	Média [g]
1	A1	-	C1	-	ya	yb	y1
2	A2	+	C1	-	ус	yd	y2
3	A1	-	C2	+	ye	yf	уЗ
4	A2	+	C2	+	yg	yh	y4

2.8.2.1.1 Cálculo dos Efeitos

De acordo com BARROS NETO (1995) o seguinte procedimento que utiliza equações matriciais pode ser usado para calcular os efeitos.

As variáveis (efeitos) principais: ângulo, carga, interação e da média global dos ensaios são respectivamente A, C, AC e M.

A seguinte matriz utiliza os sinais dos fatores da Tabela 4

$$\begin{bmatrix} --\\ +-\\ +-\\ -+\\ ++ \end{bmatrix}$$
 [2.5]

Serão adicionadas 2 colunas a esta matriz, uma de sinais positivos e outra que é o produto entre A e C, resultando em coeficientes de contraste apresentados na Equação 2.6. Trocando os sinais pela unidade, os efeitos podem ser calculados através de uma equação matricial. Cada efeito será obtido, exceto por um divisor, através do produto escalar entre seu respectivo vetor na matriz de coeficientes de contraste e o vetor da solução.

$$\begin{bmatrix} + - - + \\ + + - - \\ + - + - \\ + + + + \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + 1 - 1 - 1 + 1 \\ + 1 + 1 - 1 - 1 \\ + 1 - 1 + 1 - 1 \\ + 1 + 1 + 1 + 1 \end{bmatrix} = X$$
[2.6]

No caso geral de um planejamento de 2 níveis com K fatores, no qual existem 2^K testes, o divisor será 2K-1 para os efeitos e 2K para a média.

Os efeitos serão, exceto pela falta dos divisores, dados por:

$$X^{t}y = \begin{bmatrix} +1+1+1+1\\ -1+1-1+1\\ -1-1+1+1\\ +1-1-1+1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} y_{1}\\ y_{2}\\ y_{3}\\ y_{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{d}\\ A_{d}\\ C_{d}\\ AC_{d} \end{bmatrix}$$
[2.7]

Onde:

$$M = \frac{Md}{2k}; \qquad A = \frac{Ad}{2k-1}; \qquad C = \frac{Cd}{2k-1}; \qquad A = \frac{Cd}{2k-1}$$

[2.10]

2.8.2.1.2 Estimativa do Erro Experimental

Os testes da Tabela 4 foram realizados em duplicata para fornecer uma estimativa do erro experimental e, em consequência, permitir a análise da significância estatística dos efeitos.

No caso geral, se cada teste for replicado n_i vezes e se existem m diferentes testes, a Equação [2.8] fornece uma estimativa da variância amostral.

$$s^{2} = \frac{(\nu_{1}s_{1}^{2} + \nu_{2}s_{2}^{2} + \dots + \nu_{m}s_{m}^{2})}{(\nu_{1} + \nu_{2} + \dots + \nu_{m})}$$
[2.8]

Onde $V_i = n_i - 1$ é o número de graus de liberdade de s_i^2 , uma estimativa da variância do **i**ésimo termo.

De acordo com Barros Neto (1995) a variância do efeito pode ser obtida por:

$$s(efeito) = \sqrt{\frac{s^2}{2}}$$
[2.9]

2.8.2.1.3 Interpretação dos Resultados

É necessário verificar se os efeitos são maiores que zero, logo deve ser feito um teste t no nível de α % de confiança e obter o seguinte intervalo.

0 + t*s(efeito)

Se os efeitos forem maiores do que o intervalo acima, pode-se concluir que eles são significativos, sendo necessário estudá-los.

A existência de um efeito de interação significa que os efeitos principais precisam ser compreendidos de maneira conjunta, para isso recomenda-se traçar o diagrama apresentado na Figura 38.



Figura 38:Diagrama para compreender os resultados do planejamento fatorial
3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais

O trabalho foi realizado em duas etapas. Na primeira foi realizada a validação da máquina de testes, comparando seus resultados com dados experimentais obtidos em provas em campo

Na segunda etapa, uma vez validada a máquina de testes, foram feitos experimentos variando o contra-corpo, utilizando pavimentos retirados da rodovia Santos Dumont (SP-75), de modo a determinar o desempenho do pneu em diferentes pavimentos. A Figura 39 apresenta um resumo das etapas deste trabalho.



Figura 39: Resumo das atividades com a máquina de testes.

Todos os corpos-de-prova foram confeccionados com compostos de borracha da banda de rodagem de pneus automotivos, preparados pela Pirelli Pneus Ltda (Pirelli-Brasil). O contra-corpo da primeira etapa de testes foi enviado pelo Centro de Pesquisas da Pirelli de Milão (Pirelli-Itália). Para a segunda etapa de testes os contra-corpos foram retirados da rodovia Santos Dumont SP-75, sendo a extração realizada pela equipe do LTP-EPUSP. As Tabelas 5 e 6

apresentam respectivamente a denominação e a procedência das amostras de corpo-de-prova e de contra-corpo.

Fase	Denominação	Procedência
	B1	Pirelli-Brasil
Etopo 1	B2	Pirelli-Brasil
сара т	B3	Pirelli-Brasil
	B4	Pirelli-Brasil
Etapa 2	B5	Pirelli-Brasil

Tabela 5: Denominação e procedência dos corpos-de-prova testados

Fase	Denominação	Procedência
Etapa 1	M2	Pirelli Itália
Etapa 2	Microrrevestimento	SP 75 – Km 20 + 890 m – Sorocaba / Campinas
	TSD	SP 75 – Km 20 + 905 m – Sorocaba / Campinas
	SMA	SP 75 – Km 18 + 510 m – Campinas / Sorocaba
	CBUQ	SP 75 – Km 18 + 495 m – Campinas / Sorocaba

3.1.1 Corpos-de-Prova – Características

O corpo-de-prova (CP) foi confeccionado no formato de uma roda de borracha maciça (80 mm de diâmetro e 20 mm de espessura). A Figura 40 mostra o corpo-de-prova utilizado nos testes e as Tabelas 7 e 8 apresentam as propriedades mecânicas e a formulação dos compostos de borracha dos corpos-de-prova testados.



Figura 40: Corpo-de-prova utilizado na máquina de testes

Tabela 7: Propriedades	mecânicas dos	s compostos	de borracha	testados.
rabola r. rophoadaoo	mooumouo aoc	00111000000	ao son aona	

Composto	Módulo	Top S	
Composio	E'	E"	14110
B1	5,78	1,07	0,19
B2	6,51	0,96	0,15
B3	7,12	0,99	0,14
B4	5,90	1,16	0,20
B5	7,64	2,61	0,34

	Borracha (%)			Negro de Fumo Características		
Composto	NR	BR	SBR	(%)	Área Superficial (m ² /g)	Estrutura
B1	54	0	6	30	120	113
B2	53	6	0	28,70	115	106
B3	54	6	0	30	112	125
B4	29	14,5	14,5	32	104	114
B5	0	8	45	37	120	113

Tabela 8: Formulação dos compostos de borracha testados.

Todos os compostos foram vulcanizados em condições semelhantes.

3.1.2 Contra-Corpos – Características

A Tabela 9 apresenta os contra-corpos utilizados nos testes classificados de acordo com suas macrotextura e microtextura.

	Manch	na de Areia	Pênc	dulo Britânico
Contra-Corpo	Hs médio [mm]	Classificação Macrotextura	[BPN]	Classificação Microtextura
M2	0,80	Média	50,20	Medianamente Rugosa
Microrrevestimento	0,73	Média	53,70	Medianamente Rugosa
TSD	1,52	Muito Aberta	60,60	Rugosa
SMA	0,52	Média	35,00	Lisa
CBUQ	0,21	Fechada	50,80	Medianamente Rugosa

Tabela 9: Classificação da macrotextura e microtextura dos contra-corpos utilizados

As Figuras 41 e 42 apresentam os contra-corpos utilizados nos testes.



Figura 41: A) Dispositivo utilizado para a extração do contra-corpo na rodovia Santos Dumont SP-75 (equipamento do LTP-EPUSP); B) contra-corpo



E) Figura 42: Aspecto da superfície dos Contra–corpos: A) M2, B) Microrrevestimento, C) TSD, D) SMA, E) CBUQ.

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaio em Campo

Para obter os dados de campo foram utilizados caminhões de teste equipados com pneus que possuíam em sua banda de rodagem os mesmos compostos de borracha estudados. O teste em campo consiste em deixar os caminhões percorrerem um trajeto determinado e medir a perda de massa nos pneus no final do percurso. Estes testes fornecem a resposta de como cada composto de borracha irá se comportar no mercado, no entanto a sua realização é dispendiosa, demandando altos custos e sendo necessário esperar por volta de seis meses para obter resultados. A dificuldade para obter resposta através dos testes em campo foi a motivação para o desenvolvimento da máquina de testes de laboratório.

Os ensaios em campo foram realizados com carga média aplicada nos pneus de 3.500 kgf, com uma área de contado pneu-pavimento média de 34.000 mm^2 .

3.2.2 Ensaio em Laboratório

3.2.2.1 Concepção e construção da máquina de testes

Está em curso o desenvolvimento de uma nova metodologia para uma nova máquina de desgaste para compostos de borracha, criada numa parceria entre o LFS, da Universidade de São Paulo e a Pirelli Pneus Ltda, cujo pedido de patente está em andamento. Esta máquina executa ensaios de desgaste contra discos de asfalto extraído das rodovias. O corpo-de-prova é uma roda de borracha maciça e rola sobre um disco de asfalto com velocidade, carga e escorregamento controlados. O escorregamento é definido pelo ângulo de deriva do corpo-de-prova com relação à trajetória.

A concepção da máquina de teste surgiu da necessidade de avaliar o comportamento quanto ao desgaste de compostos de borracha da banda de rodagem de pneus considerando o rolamento e o deslizamento simultâneos, de

maneira a simular as condições encontradas em pneus de veículos automotivos e reproduzir seus mecanismos de desgaste.

De modo a permitir tanto o rolamento quanto o escorregamento, o corpo-deprova (CP) é confeccionado no formato de uma roda de borracha maciça (80 mm de diâmetro e 18 mm de espessura). Em cada teste o CP é submetido a diferentes condições de velocidade, carga e ângulo aplicados, simulando em condições controladas, alguns dos esforços aos quais o composto da banda de rodagem estará submetido durante a sua vida útil.

Para tornar o ensaio mais próximo das condições reais de utilização, o aparato permite a fixação de contra-corpos produzidos a partir de pavimentos utilizados nas vias.

Uma vez estabelecidos os parâmetros operacionais, o CP e o contra-corpo, foi construído protótipo de máquina de teste para a realização dos ensaios em laboratório.

3.2.2.2 Características da Máquina de Teste

A máquina de ensaio utilizada nesta Dissertação foi projetada e construída no Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, através de Projetos de Iniciação Científica, [Joaquim (2001), Kati (2002) e Ribeiro (2002)] e Projetos de Formatura com o apoio da Pirelli Pneus Ltda, [Abe (2001), Souza (2001), Zuppani (2001), Oliveira (2001) e Cardoso (2002)].

As características da máquina de teste estão apresentadas na Tabela 10:

Parâmetro	Amplitude
Velocidade (km/h)	0 a 10
Carga (N)	15 a 500
Ângulo de deriva (radianos)	0 a 0,35

Tabela 10: Características da máquina de teste

A configuração da máquina oferece a possibilidade, através da construção de suportes, de variar os ângulos de cambagem e cáster, além de proporcionar testes em condição de pista seca ou molhada.

A Figura 43 apresenta uma visão geral da máquina de teste.



Figura 43:máquina para desgaste de roda de borracha contra disco de asfalto.

3.2.2.3 Metodologia de Ensaio

O teste consiste numa roda de borracha feita com composto utilizado em banda de rodagem de pneus comerciais fabricadas pela Pirelli Pneus Ltda, que rola contra um disco de asfalto. A roda de borracha é lisa, sem o desenho de banda de rodagem para minimizar o número de variáveis envolvidas.

Neste estudo os ensaios foram executados em temperatura ambiente e em condição de pavimento seco. A máquina de ensaio também permite efetuar provas sob condição de pavimento molhado.

As condições de ensaio consistem na velocidade, carga vertical e ângulo de deriva impostos à roda de borracha. A Tabela 11 apresenta os parâmetros dos ensaios

Fator	Ângu deriva	lo de [graus]	Carga	a [kgf]	Velocidade [km/h]
Nível	2	5	5	8	2

Tabela 11:Parâmetros dos ensaios

A velocidade foi mantida constante em 2 km/h após a realização de testes preliminares para a determinação da severidade das condições de ensaio.

A análise foi realizada em duplicata, de forma aleatória para cada condição de teste.

Na Figura 44 apresenta-se a atuação dos parâmetros de ensaio na roda de borracha.



Figura 44: Corpo-de-prova com atuação dos parâmetros de ensaio. V: velocidade, C: carga aplicada e A: ângulo de deriva.

Após um intervalo de tempo pré-definido, a perda de massa da roda de borracha é medida através de uma balança analítica.

3.2.3 Análise da Morfologia do Desgaste

O erro mais frequente no planejamento de ensaios acelerados é o de tentar reproduzir os movimentos e as condições de solicitações ocorridos na utilização dos materiais a serem avaliados. Os ensaios realizados nestas condições, via de regra, não reduzem o tempo de ensaio. Assim, para acelerar o ensaio, normalmente utilizam variáveis experimentais muito maiores do que o

real, como por exemplo a carga de ensaio ou a velocidade. Resultados obtidos nestes ensaios nem sempre apresentam correlação com os dos sistemas reais. A correlação só é possível quando os fenômenos observados são iguais isto é, o mesmo mecanismo de desgaste. Se o fenômeno (mecanismo) não for o mesmo, como no caso em que na utilização real ocorre um desgaste moderado e no ensaio acelerado o mecanismo é severo, ou no caso real o desgaste é por rolamento e no acelerado ocorre desgaste por deslizamento, e apresentar correlação nos resultados, será uma mera coincidência.

Assim, as solicitações para a ocorrência do desgaste nos ensaios em campo e em laboratório não necessitam ser as mesmas, desde que o mecanismo envolvido no processo seja o mesmo. Em outras palavras, as condições de carregamento (carga e velocidade) poderão ser distintas, desde que em ambos o fenômeno envolvido seja o mesmo.

Antes de iniciar o tratamento estatístico dos resultados da máquina de teste em laboratório será necessário analisar se o mecanismo de desgaste envolvido é o mesmo daquele encontrado nos pneus de caminhão dos testes de campo. Para isso deve-se analisar a morfologia do desgaste dos corpos-de-prova, que devem apresentar as ondas de Schallamach.

A Figura 45 apresenta o trabalho de COSTA (2007) no qual observam-se as ondas de Schallamach na morfologia do desgaste de pneus de caminhão.



Figura 45: Morfologia do desgaste encontrado em pneus de caminhão na qual observam-se ondas de Schallamach. (Modificado de COSTA, 2007)

3.2.4 Normalização dos Resultados

Devido à diferença entre as condições de ensaio de campo e de laboratório, a análise dos resultados não é trivial, havendo necessidade de processamento dos resultados para a sua correlação.

Uma maneira para fazer a correlação é a normalização dos resultados.

Como o desgaste ocorre nas regiões onde os corpos em movimento relativo se tocam, no caso dos pneus a perda de material deve ser função da frequência.

Por outro lado, a perda de material por desgaste depende da área de contato. Assim, quantificar o desempenho pelo valor absoluto da perda de material não é adequado pois pequenas perdas para áreas pequenas podem representar maior dano do que um processo com grande perda de massa em materiais com área grande de contato, conforme exemplificado na Tabela 12.

Material	Perda de massa [ɡ]	Área de contato	Taxa de desgaste [mg/mm ²]
Α	0,03	5 mm ²	6,0
В	0,5	2 cm ²	2,5

Tabela 12: Exemplo do efeito da área de contato na taxa de desgaste

O mesmo ocorre com a solicitação mecânica, isto é, o desempenho quanto ao desgaste não pode ser avaliado com valor absoluto da força aplicada, mas deve ser analisado com a pressão de contato, ou seja, ser avaliado com a força aplicada normalizada também com a área de contato.

Resumindo, o desempenho quanto ao desgaste deve ser avaliado com:

- I. Frequência de contato
- II. Perda de massa por área de contato:

Perda de massa específica =
$$\frac{\text{perda de massa}}{\text{área de contato}} = \frac{\Delta M}{A}$$
[5.1]

III. Pressão de contato

Pressão de contato =
$$\frac{\text{força aplicada}}{\text{área de contato}} = \frac{F}{A}$$
[5.2]

Assim, para a correlação do desempenho dos compostos de borracha utilizados na fabricação do pneu os resultados dos ensaios foram normalizados conforme a Equação 5.3

$$W_E = \frac{\Delta_M}{n \times A \times \frac{F}{A}}$$
[5.3]

Onde:

 W_E : Taxa desgaste específica [mg/(ciclo*kgf)] Δ_M : Perda de massa [mg] n: Ciclos de desgaste A:Área de contato [mm²] F: Carga aplicada [kgf]

Fatorando a equação 5.3 é obtida a equação 5.4:

$$W_E = \frac{\Delta_M}{n \times F}$$
[5.4]

Observe que a área não aparece explicitamente na Equação 5.4 e a taxa de desgaste específica tem a dimensão de [mg/(ciclo*kgf)].

Assim, deve-se tomar cuidado na escolha da carga e da velocidade no ensaio em laboratório para que os seus mecanismos de desgaste representem aqueles encontrados nos ensaios em campo. De modo a tornar possível uma análise de desempenho dos resultados.

Isto implica que os ensaios acelerados não precisam ser realizados com as mesmas solicitações, mas se os mecanismos envolvidos forem os mesmos, os resultados podem ser comparados, desde que adequadamente normalizados.

3.2.5 Tratamento dos Dados

Para garantir a confiabilidade dos dados é necessário verificar a significância dos resultados experimentais. De acordo com BOX *et al.* (1978), é possível avaliar a relevância estatística de dados experimentais através de uma Tabela de análise de variância.

Detalhes para a construção desta tabela encontram-se no Apêndice A – MÉTODO PARA CONSTRUÇÃO DA TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA.

Nesta análise é calculado o valor de uma taxa representativa dos resultados experimentais. Esta taxa é comparada com uma distribuição F de (k-1, N-k) graus de liberdade, em um nível de significância escolhido. Onde k é o número de tratamentos e N é o número total de observações.

Se o valor da taxa calculada for maior do que o respectivo valor da distribuição F, há indicação de que existem diferenças entre os tratamentos analisados. Ou seja, para o exemplo do desgaste de diferentes compostos de borracha testados em mesmas condições, significa que os compostos apresentam diferentes resistências ao desgaste.

A Figura 46 apresenta o formato de uma distribuição F



Figura 46: Distribuição F com nível de significância de 95%

No exemplo da Figura 46, para obter na distribuição F(3,4) uma significância de 95% é necessário que a taxa calculada se posicione na área hachurada do gráfico, ou seja, assuma valor superior a 6,6.

Neste trabalho será adotado o nível de significância de 95%.

3.2.6 Planejamento dos Ensaios

Para auxiliar a compreensão dos fenômenos envolvidos no teste de desgaste elaborou-se um planejamento fatorial 2², o qual permite estudar em 2 níveis as variáveis e suas interações nas respostas do sistema. O planejamento fatorial consiste na determinação da influência das variáveis de entrada nas variáveis de resposta, utilizando um número mínimo de ensaios que assegurem a correta interpretação dos resultados.

A Tabela 13 apresenta os parâmetros principais do teste em laboratório.

Tabela 13: Parâmetros principais do planejamento fatorial do teste em laboratório.

Fatores	Carga, ângulo de deriva,velocidade da pista
Resposta	Taxa de desgaste

Foi feita uma triagem para diminuir o número de fatores envolvidos. De acordo com resultados preliminares foi fixada uma velocidade que permitiu um bom andamento dos ensaios.

É necessário definir se cada parâmetro, em separado, ou interações entre parâmetros, tem influência na taxa de desgaste. Foi realizado um planejamento fatorial com 2 níveis, de simples execução e capaz de ser expandido para um planejamento mais complexo, necessário quando se deseja compreender melhor a relação funcional entre resposta e fatores. A Figura 47 apresenta os parâmetros envolvidos no planejamento fatorial.



Figura 47: Parâmetros envolvidos no planejamento fatorial

4 Resultados

Primeiramente foi feito estudo para validar os resultados de testes em laboratório, fazendo comparação com resultados obtidos através de ensaios em campo, as etapas do trabalho seguem o fluxograma da Figura 48.



Figura 48: Fluxograma de atividades para a validação da máquina de testes.

Após a validação da máquina de testes foi estudada a influência de diferentes pavimentos no desgaste de composto de borracha da banda de rodagem de pneus. A Figura 49 apresenta o fluxograma de atividades



Figura 49:Fluxograma de atividades para estudo do desgaste de composto de borracha em função do tipo de pavimento.

4.1 Validação da Máquina de Ensaio

4.1.1 Ensaio em Campo

Os resultados do desgaste em campo dos compostos B1, B2, B3 e B4 estão apresentados nas Tabelas de 14 a 17. Estas Tabelas apresentam também a taxa de desgaste específica calculada conforme a Equação 5.4

Pneu	Massa Inicial [kg]	Massa Final [kg]	Distância percorrida [km]	Taxa de desgaste específica [mg/(ciclo*kgf)]
P1	64,4	59,1	58170	8,16E-05
P2	63,7	57,5	58170	9,55E-05
P3	64,7	59,6	99810	4,58E-05
P4	63,8	58,5	99810	4,76E-05
P5	64,6	59,6	76590	5,85E-05
P6	63,6	58,6	76590	5,85E-05
P7	61,4	59,6	58800	2,74E-05
P8	61,3	58,5	58800	4,27E-05
P9	61,3	56,5	114400	3,76E-05
P10	61,5	56,3	114400	4,07E-05

Tabela 14: Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o composto B1

Pneu	Massa Inicial [kg]	Massa Final [kg]	Distância percorrida [km]	Taxa de desgaste específica [mg/(ciclo*kgf)]
P11	61,8	57,6	51220	7,35E-05
P12	61,8	55,0	51220	1,19E-04
P13	64,2	59,7	70490	5,72E-05
P14	63,5	56,7	70490	8,64E-05
P15	64,0	60,1	58130	6,01E-05
P16	63,1	58,6	58130	6,93E-05
P17	61,1	56,2	83550	5,25E-05
P18	61,1	54,6	83550	6,97E-05
P19	61,3	56,0	83220	5,71E-05

Tabela 15 - Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o composto B2.

Tabela 16: Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o composto B3

Pneu	Massa Inicial [kg]	Massa Final [kg]	Distância percorrida [km]	Taxa de desgaste específica [mg/(ciclo*kgf)]
P20	60,9	57,0	72480	4,82E-05
P21	60,7	55,4	72480	6,55E-05
P22	60,9	57,4	63420	4,94E-05
P23	60,9	56,5	63420	6,21E-05
P24	61,8	58,0	62370	5,46E-05
P25	61,4	58,0	62370	4,88E-05
P26	62,0	58,9	48830	5,69E-05
P27	61,8	58,9	48830	5,32E-05
P28	61,9	60,5	36880	3,40E-05
P29	61,4	59,8	36880	3,89E-05

Tabela 17: Taxa de desgaste específica para pneus de caminhão fabricados com o composto B4

Pneu	Massa Inicial [kg]	Massa Final [kg]	Distância percorrida [km]	Taxa de desgaste específica [mg/(ciclo*kgf)]
P30	63,0	59,0	70490	5,08E-05
P31	63,7	56,6	70490	9,02E-05
P32	63,6	59,4	100440	3,75E-05
P33	63,4	58,5	100440	4,37E-05
P34	62,9	59,7	76330	3,76E-05
P35	63,9	60,2	76330	4,34E-05
P36	61,6	58,9	96600	2,50E-05
P37	61,7	58,2	96600	3,25E-05
P38	61,4	58,5	96600	2,69E-05
P39	61,7	57,4	96600	3,99E-05
P40	61,1	58,1	98700	2,72E-05

4.1.2 Morfologia do Desgaste dos Testes em Laboratório

As Figuras de 50 a 52 apresentam a morfologia do desgaste encontrado nos corpos-de-prova utilizados nos testes em laboratório com composto B4. Esta morfologia é equivalente nos demais compostos testados.



Figura 50: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com pavimento M2 e composto B4. A) Região da ampliação; B) ondas de Schallamach e C) riscos longitudinais. Condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h.



Figura 51: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com pavimento M2 e composto B4. A) Região da ampliação; B) ondas de Schallamach e C) riscos longitudinais. Condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h



Figura 52: Morfologia do desgaste encontrado na borda dos corpo-de-prova ensaiados com pavimento M2 e composto B4. Condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU (2006).

De acordo com estas Figuras de 50 a 52 observa-se que a morfologia do desgaste dos corpos-de-prova apresenta as ondas de Schallamach, logo as condições de teste da máquina de laboratório representam o mecanismo de desgaste encontrado em pneus de caminhão.

4.1.3 Resultados em Laboratório

Os resultados dos ensaios de desgaste em laboratório dos compostos B1, B2, B3 e B4 e pavimento M2 estão apresentados nas Tabelas 18 a 33 abaixo.

Amostra	Am1	Am2
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	30,3	10,1
8000	32,7	21,1
12000	41,7	31,6
16000	59,8	42,5
20000	75,7	53,4
24000	92,4	63,4
28000	105,3	77,7
32000	123,9	89,5
36000	138,8	99,8
40000	159,3	105,8

Tabela 18: Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavimento M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h

Amostra	Am3	Am4
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]]
0	0,0	0,0
4000	58,8	19,9
8000	68,6	38,4
12000	86,9	58,0
16000	113,0	82,4
20000	135,0	103,9
24000	155,7	120,6
28000	181,7	135,3
32000	200,6	156,7
36000	229,0	205,6
40000	264,4	235,5

Tabela 19:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavimento M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Tabela 20:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavimento M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h

Amostra	Am5	Am6
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	36,5	15,8
8000	50,4	29,8
12000	69,2	49,4
16000	93,4	74,0
20000	116,7	98,8
24000	143,8	126,4
28000	172,3	156,0
32000	201,6	188,9
36000	230,8	222,9
40000	260,9	251,3

Tabela 21:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B1, pavimento M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am7	Am8
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	64,6	33,2
8000	101,6	64,4
12000	138,3	91,2
16000	172,8	133,0
20000	209,1	173,4
24000	251,6	216,3
28000	302,4	260,2
32000	348,1	311,4
36000	396,4	359,7
40000	441,3	412,8

Amostra	Am9	Am10
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	32,0	23,1
8000	44,7	41,9
12000	64,0	63,0
16000	76,6	81,5
20000	89,1	103,5
24000	114,5	118,2
28000	142,3	132,7
32000	162,7	146,9
36000	183,9	165,0
40000	200,9	182,3

Tabela 22:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h

Tabela 23:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am11	Am12
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	21,4	73,9
8000	49,2	84,9
12000	76,8	97,2
16000	96,2	116,8
20000	119,3	137,9
24000	139,4	162,0
28000	161,7	186,2
32000	185,2	210,9
36000	205,3	238,6
40000	231,2	263,9

Tabela 24:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h

Amostra	Am13	Am14
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	27,6	12,7
8000	50,7	21,2
12000	76,8	42,0
16000	103,1	63,1
20000	128,1	84,8
24000	154,7	112,6
28000	181,6	139,5
32000	213,3	163,7
36000	245,4	190,2
40000	276,4	218,6

Amostra	Am15	Am16
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	39,8	52,1
8000	75,9	85,7
12000	113,2	117,0
16000	149,2	158,6
20000	188,7	197,9
24000	229,0	242,4
28000	271,5	284,7
32000	311,0	327,8
36000	355,2	373,2
40000	398,8	420,5

Tabela 25:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B2, pavimento M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h

Tabela 26:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h

Amostra	Am17	Am18
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	34,6	14,8
8000	44,7	28,6
12000	55,7	41
16000	66,2	56
20000	77,1	70,4
24000	88,0	83,9
28000	98,0	96,5
32000	112,3	110,2
36000	124,1	124,6
40000	134,4	137,1

Tabela 27:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra Am19		Amostra	Am19	Am20
Ciclos	os Perda [mg] Perda [m			
0	0,0	0,0		
4000	21,4	44,1		
8000	45,8	64,2		
12000	67,6	78,6		
16000	89,7	94,6		
20000	108,4	121,5		
24000	128,8	141,5		
28000	148,4	163,8		
32000	171,3	186,2		
36000	191,4	208,5		
40000	212,8	229,2		

Amostra	Am21	Am22
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	21,2	24,7
8000	33,1	47,3
12000	46,7	67,9
16000	64	89,3
20000	74,9	113,3
24000	91,8	132,4
28000	113,9	154,8
32000	131,3	180,2
36000	151	202,4
40000	168,3	223,4

Tabela 28:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h

Tabela 29:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B3, pavimento M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am23	Am24
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	34,5	40
8000	68,2	83,3
12000	103,2	107,3
16000	135,8	144,7
20000	168,6	182,4
24000	204,5	219,9
28000	232,8	252,6
32000	264,6	287,3
36000	293,2	331,1
40000	327,4	368,5

Tabela 30:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento M2, condições: 2 graus, 5 kgf, 2 km/h

Amostra	Am25	Am26
Ciclos	Ciclos Perda [mg] Perda [n	
0	0,0	0,0
4000	14,8	13,9
8000	27,0	28,6
12000	38,0	41,7
16000	49,8	53,5
20000	62,9	65,6
24000	75,6	77,7
28000	87,7	88,9
32000	100,2	99,6
36000	110,7	114,7
40000	122,4	129,7

Amostra	Am27	Am28
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	23,4	23,9
8000	43,3	48,6
12000	62,9	65,4
16000	81,4	87,5
20000	101,3	106,4
24000	120,7	123,4
28000	141	139,3
32000	159,4	158,3
36000	179,7	177,6
40000	196,1	195,4

Tabela 31:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento M2, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Tabela 32:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento M2, condições: 5 graus, 5 kgf, 2 km/h

Amostra	Am29	Am30
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	21,1	31
8000	42,3	54,9
12000	61,3	81,4
16000	78,9	103,6
20000	98,2	123,7
24000	116,7	143,8
28000	133,8	159,8
32000	151,5	175,4
36000	172,2	190,4
40000	189	209

Tabela 33:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B4, pavimento M2, condições: 5 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am31	Am32
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0,0	0,0
4000	34,2	54,7
8000	65,1	76,5
12000	93,7	99,8
16000	128,1	126,3
20000	156,9	152,9
24000	187,6	175,5
28000	217,4	201,8
32000	248,8	229,3
36000	278,7	254,8
40000	306,2	278,2

A taxa de desgaste foi determinada pela inclinação das curvas apresentadas nas Figuras de 53 a 68



Figura 53:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 18)



Figura 54:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 19)



Figura 55:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 20)



Figura 56:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B1, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 21)



Figura 57:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 22)



Figura 58:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 23)



Figura 59:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 24)



Figura 60:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B2, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 25)



Figura 61:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 26)



Figura 62:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 27)



Figura 63:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 28)



Figura 64:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B3, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 29)



Figura 65:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B4, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 30)



Figura 66:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B4, pavimento M2, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 31)



Figura 67:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B4, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 5 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 32)



Figura 68:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B4, pavimento M2, condições: ângulo 5 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 33)

Os resultados dos testes em laboratório dos compostos B1, B2, B3 e B4 estão apresentados em função da taxa de desgaste específica na Tabela 34.

Composto	Ângulo [graus]	Carga [kgf]	Amostra	Taxa de desgaste específica [mg/ciclo*kgf]
		5	Am1	7,80E-04
	2	5	Am2	5,40E-04
	2	8	Am3	8,25E-04
R1		8	Am4	6,75E-04
ы		5	Am5	1,26E-03
	5	5	Am6	1,16E-03
	5	8	Am7	1,38E-03
		8	Am8	1,21E-03
		5	Am9	1,02E-03
	2	5	Am10	9,60E-04
	2	8	Am11	7,38E-04
BO		8	Am12	8,50E-04
DZ		5	Am13	1,34E-03
	5	5	Am14	1,02E-03
		8	Am15	1,23E-03
		8	Am16	1,30E-03
		5	Am17	7,20E-04
	2	5	Am18	7,00E-04
	2	8	Am19	7,38E-04
B3		8	Am20	6,75E-04
		5	Am21	8,20E-04
	5	5	Am22	1,12E-03
	5	8	Am23	1,15E-03
		8	Am24	1,05E-03
	2 B4 5	5	Am25	6,20E-04
		5	Am26	6,40E-04
		8	Am27	6,38E-04
B4		8	Am28	6,25E-04
		5	Am29	1,12E-03
		5	Am30	9,60E-04
		8	Am31	9,13E-04
		8	Am32	9,75E-04

Tabela 34: Resumo dos resultados de testes em laboratório do desgaste dos compostos B1, B2, B3 e B4.

As Figuras de 69 a 73 mostram os resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função de componentes de suas formulações, obtidos nas Tabelas 7 e 8.



Figura 69: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função do nível de negro de fumo da formulação. A) Laboratório. B) Campo.



Figura 70: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função da área superficial do negro de fumo da formulação. A) Laboratório. B) Campo.



Figura 71: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função da tangente de delta. A) Laboratório. B) Campo.



Figura 72: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função da porcentagem de BR na formulação. A) Laboratório. B) Campo.



Figura 73: Resultados da taxa de desgaste específica dos compostos B1, B2, B3 e B4 em função da porcentagem de SBR na formulação. A) Laboratório. B) Campo.

4.2 Testes com Diferentes Tipos de Pavimentos

Após a validação da máquina, iniciaram-se os ensaios para o estudo do desempenho dos compostos de borracha utilizados na fabricação dos pneus de veículos automotivos em função dos pavimentos das rodovias.

À semelhança dos ensaios para a validação da máquina de desgaste, foram analisadas as morfologias de desgaste do composto B5, obtidas em cada pavimento e suas taxas de desgaste específicas. Estas taxas de desgaste foram posteriormente comparadas com as informações de micro e macrotextura de cada pavimento.

4.2.1 Morfologia do Desgaste dos Testes em Laboratório

As Figuras de 74 a 77 apresentam a morfologia do desgaste encontrado na região da borda dos corpos-de-prova utilizados nos testes com composto B5 e diferentes pavimentos:



Figura 74:Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com o pavimento CBUQ, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU (2006).



Figura 75: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com o pavimento SMA, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU (2006).


Figura 76: Morfologia do desgaste encontrado nos corpo-de-prova ensaiados com o pavimento Microrrevestimento, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU (2006).



Figura 77: Morfologia do desgaste encontrado nos corpos-de-prova ensaiados com o pavimento TSD, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h. NAKATU (2006).

De acordo com estas Figuras de 74 a 77 observa-se que a morfologia do desgaste dos corpos-de-prova apresenta as ondas de Schallamach, logo as condições de teste da máquina de laboratório representam o mecanismo de desgaste encontrado em pneus de caminhão.

4.2.2 Resultados em Laboratório

Os resultados dos testes contra diferentes pavimentos apresentam-se nas Tabelas de 35 a 38

Tabela 35: Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento Microrrevestimento, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am33	Am34
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]
0	0	0
15000	9,8	7,1
30000	16,6	22,4
45000	28,2	32,7

Tabela 36:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento TSD, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am35	Am36		
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]		
0	0	0		
15000	17,4	15,4		
30000	28,0	26,1		
45000	43,2	38,3		

Tabela 37:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento SMA, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am37	Am38		
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]		
0	0	0		
15000	8,8	8,8		
30000	16,6	20,4		
45000	24,4	30,4		

Tabela 38:Resultados dos ensaios de laboratório para composto de borracha B5, pavimento CBUQ, condições: 2 graus, 8 kgf, 2 km/h

Amostra	Am39	Am40		
Ciclos	Perda [mg]	Perda [mg]		
0	0	0		
15000	9,6	9,8		
30000	20,8	19,3		
45000	30,3	25,7		

A taxa de desgaste foi determinada pela inclinação das curvas apresentadas nas Figuras de 78 até 81



Figura 78:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B5, pavimento Microrrevestimento, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 35)



Figura 79:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B5, pavimento TSD, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 36)







Figura 81:Perda de massa acumulada . Composto de borracha B5, pavimento CBUQ, condições: ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 38)

A Tabela 39 consolida os resultados de teste em laboratório do desgaste do composto de borracha B5 para diferentes tipos de pavimento, obtidos através das Figuras de 78 a 81.

Pavimento	Ângulo [graus]	Carga [kgf]	Amostra	Taxa de desgaste específica [mg/ciclo*kgf]
Microrrovostimonto			Am33	7,75E-05
wiicionevesiineniio		8	Am34	9,11E-05
TOD	2		Am35	1,23E-04
130			Am36	1,11E-04
SMA			Am37	8,55E-05
SIVIA			Am38	7,00E-05
CBUO			Am39	7,63E-05
CBUQ			Am40	8,64E-05

 Tabela 39: Valores de taxa de desgaste específica para testes com diferentes pavimentos realizados com velocidade 2 km/h

5 Discussão

5.1 Análise da Reprodução do Mecanismo de Desgaste de Compostos de Borracha na Máquina de Teste em Laboratório

A correlação entre resultados obtidos em testes de campo com os obtidos em ensaios acelerados só faz sentido se os fenômenos observados forem iguais. Se não houver reprodução do mecanismo de desgaste, uma correlação entre resultados terá sido mera coincidência.

As Figuras de 50 a 52 e as Figuras de 74 a 77 que representam os corpos-deprova após ensaio na máquina de testes apresentam a morfologia de desgaste encontrada em compostos de borracha, as ondas de Schallamach, conforme apresentado nas Figuras 34, 35 e 45.

Uma vez confirmada a reprodução do mecanismo de desgaste de compostos de borracha na máquina de teste é possível prosseguir com a análise estatística dos resultados.

5.2 Validação da Máquina de Testes

Os testes preliminares para a validação da máquina construída no LFS, para verificar se os ensaios acelerados em laboratório são capazes de avaliar o desempenho dos compostos de borracha utilizados na fabricação dos pneus, foram feitos em duas etapas. A primeira foi a análise estatística dos resultados, para verificar a representatividade dos ensaios realizados, seguida de comparação dos resultados dos ensaios em campo com os em laboratório.

A seguir serão discutidas as etapas realizadas.

5.2.1 Análise Estatística dos Resultados do Teste em Campo

Esta análise foi feita para verificar se as diferenças entre resultados de campo realmente mostram que cada composto de borracha desgasta de maneira diferente ou tem-se apenas uma nuvem de resultados aleatórios. Foi elaborada tabela de análise de variância para os compostos B1, B2, B3 e B4. A Tabela 40 apresenta os resultados para uma distribuição F(3,36) 95%.

Hipótese: No teste de campo os compostos B1, B2, B3 e B4 apresentaram diferentes resistências ao desgaste

Tabela 40 - Análise estatística dos dados de campo dos compostos B1, B2, B3 e B4 através de uma distribuição F(3,36) 95%

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Таха	F(3,36) 95%
Entre os Tratamentos ST	5,78E-03	3	1,93E-03	4,9	2,9
Dentro dos Tratamentos SR	1,42E-02	36	3,95E-04		

De acordo com esta Tabela 40 a taxa obtida é superior à distribuição F(3 36) a 95%, logo existem evidências (95% de chance) que viabilizam a aceitação da hipótese, ou seja, as diferenças entre os resultados podem ser atribuídas a diferenças entre tratamentos.

Confirmada a relevância estatística dos dados, foi feita a análise de seu comportamento quanto ao desgaste que será discutido a seguir.

5.2.2 Análise Estatística dos Dados da Máquina de Laboratório

Confirmada a reprodução do mecanismo de desgaste encontrado em pneus, foi realizada a verificação estatística da máquina de laboratório utilizando-se os resultados dos compostos B1, B2, B3 e B4 para ângulos de deriva de 2 e 5 graus.

Foram elaboradas tabelas de análise de variância dos compostos B1, B2, B3 e B4 para uma distribuição F(3,12) 95%. As Tabelas 41 e 42 apresentam os resultados para ângulos de deriva de 2 e 5 graus.

Hipótese: No teste de laboratório os compostos B1, B2, B3 e B4 apresentaram diferentes resistências ao desgaste para um dado ângulo de deriva.

Tabela 41: Análise estatística dos resultados de teste em laboratório com ângulo de deriva de 2 graus para s compostos B1, B2, B3 e B4 através de uma distribuição E(3.12) 95%

1 (0,12) 3570								
Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Graus de Média iberdade Quadrática		F(3,12) 95%			
Entre os Tratamentos ST	1,48E-07	3	4,95E-08	6,1	3,5			
Dentro dos Tratamentos SR	9,72E-08	12	8,10E-09					

Tabela 42: Análise estatística dos resultados de teste em laboratório com ângulo de deriva de 5 graus para s compostos B1, B2, B3 e B4 através de uma distribuição E(3.12) 95%

1 (3,12) 9370								
Fonte de Variação	onte de Soma de ariação Quadrados		Graus de Média Liberdade Quadrática		F(3,12) 95%			
Entre os Tratamentos ST	2,05E-07	3	6,82E-08	4,6	3,5			
Dentro dos Tratamentos SR	1,77E-07	12	1,47E-08					

As Tabelas 41 e 42 apresentam taxas superiores à distribuição F(3,12) a 95%, logo existem evidências (95% de chance) que viabilizam a aceitação da hipótese, ou seja, as diferenças entre os resultados podem ser atribuídas a diferenças entre tratamentos.

Uma vez confirmada a relevância estatística dos dados, foi feita a análise de seu comportamento quanto ao desgaste.

5.2.3 Comparação entre Resultados em Campo e em Laboratório

Conforme mencionado anteriormente, os resultados do teste de desgaste em laboratório e em campo foram normalizados, obtendo-se a taxa de desgaste específica para cada composto de borracha, para poderem ser comparados.

Com os resultados em laboratório apresentados nas Figuras de 53 a 68, em função do ângulo de deriva, os compostos foram classificados em função do desgaste e estão apresentados nos histogramas das Figuras 82 e 83. Pode-se observar que para ângulo de deriva de 2 graus o composto B2 apresenta o maior valor de taxa de desgaste específica. No entanto, para ângulo de deriva

5 graus o composto B1 apresenta os maiores valores. Este comportamento evidencia a mudança da severidade do desgaste em função do ângulo de deriva.



Figura 82:Resultados de laboratório, média da Taxa de desgaste específico para ângulo de deriva 2 graus



Figura 83: Resultados de laboratório, média da Taxa de desgaste específica para ângulo de deriva 5 graus

Os resultados do teste em campo estão apresentados na Figura 84. De modo a simplificar o tratamento dos dados, foi considerada uma carga média aplicada aos pneus.



Figura 84: Resultados de campo, média da taxa de desgaste específica

Comparando os resultados de desgaste do teste em campo com os do teste em laboratório pode-se observar que ambas as taxas de desgaste específicas apresentam ordens de grandeza semelhantes. Os resultados em laboratório indicam que o ângulo de deriva de 2 graus apresenta severidade de desgaste semelhante à dos testes em campo (vide Figuras 82 e 84).

É importante ressaltar que nos testes em campo os valores de ângulo de deriva não são constantes, dependendo tanto do alinhamento inicial das rodas quanto do esterçamento do volante durante as manobras. Deve também ser levado em consideração que tanto a agressividade do pavimento (novo ou velho, liso ou rugoso, seco ou molhado) e as cargas efetivamente suportadas pelos pneus também variam durante o teste em campo.

Os resultados apresentados validam a máquina de desgaste, mostrando que este equipamento é capaz de reproduzir o mecanismo de desgaste encontrado

em pneus de caminhão (ondas de Schallamach), simulando as condições de campo e classificando os compostos testados em laboratório de modo semelhante com relação ao desgaste obtido nos testes em campo. É importante também ressaltar que comparando o teste em laboratório com o teste em campo, o realizado em laboratório requer menores custos, além de ser muito mais rápido em sua execução (em média 20 dias contra os 180 dias dos testes em campo).

5.2.4 Parâmetros da Máquina de Laboratório

Uma vez validada a máquina de testes foi avaliada a sensibilidade de seus diferentes parâmetros de ajuste nos resultados. Para tanto foi desenvolvido um planejamento fatorial 2^2 .

Os resultados do planejamento dos testes são apresentados nas Tabelas de 43 a 50.

Teste	Ângulo de deriva [graus]		Carg [kgf	ja []	Taxa desga [mg/ci	de iste clo]	Média [mg/ciclo]
1	2	-	5	-	0,0039	0,002	0,0033
2	5	+	5	-	0,0063	0,005	0,0061
3	2	-	8	+	0,0066	0,005	0,0060
4	5	+	8	+	0,0110	0,009	0,0104

Tabela 43:Dados para o planejamento fatorial 22 do composto de borracha B1

Tabela 44:Resultados do planejamento fatorial 2² do composto de borracha B1. A -Ângulo de deriva, C - Carga, AC – Efeito de Interação e M – Média global dos testes.

	Efeito [mg/ciclo]			Erro	Intervalo de confianca.
М	А	С	AC	estimado [mg/ciclo]	α=10% [mg/ciclo]
0,0064	0,0036	0,0035	0,0008	0,0005	0,0012

Teste	Ângulo de deriva [graus]		Carga [kgf]		Taxa de [mg/	desgaste ciclo]	Média [mg/ciclo]
1	2	-	5	-	0,0051	0,0048	0,0050
2	5	+	5	-	0,0067	0,0051	0,0059
3	2	-	8	+	0,0059	0,0068	0,0064
4	5	+	8	+	0,0098	0,0104	0,0101

Aligulo de l	Aliguio de deliva, C - Calga, AC - Eleito de Intelação e M - Media giobal dos testes.					
	Efeito [mg/ciclo]				Intervalo de confianca.	
М	А	С	AC	estimado [mg/ciclo]	α=10% [mg/ciclo]	
0,00684	0,0024	0,0028	0,0014	0,0005	0,0010	

Tabela 46:Resultados do planejamento fatorial 22 do composto de borracha B2. A -Ângulo de deriva, C - Carga, AC – Efeito de Interação e M – Média global dos testes.

Tabela 47: Dados para o planejamento fatorial 22 do composto de borracha B3.

Teste	Ângu deriva	llo de [graus]	Ca [k	Carga Taxa de desgaste Média [kgf] [mg/ciclo]]		Taxa de desgaste [mg/ciclo]	
1	2	-	5	-	0,0036	0,0035	0,0036
2	5	+	5	-	0,0056	0,0041	0,0049
3	2	-	8	+	0,0059	0,0054	0,0057
4	5	+	8	+	0,0092	0,0084	0,0088

Tabela 48: Resultados do planejamento fatorial 22 do composto de borracha B3. A - Ângulo de deriva, C - Carga, AC – Efeito de Interação e M – Média global dos testes.

	Efeito [n	ng/ciclo]		Erro	Intervalo de confianca.
М	А	С	AC	estimado [mg/ciclo]	α=10% [mg/ciclo]
0,0057	0,0022	0,0030	0,0009	0,0004	0,0009

Tabela 49: Dados para o planejamento fatorial 22 do composto de borracha B4.

Teste	Ângu deriva	llo de [graus]	Ca [k	rga gf]	Taxa de desgaste [mg/ciclo]		Média [mg/ciclo]
1	2	-	5	-	0,0032	0,0031	0,0032
2	5	+	5	-	0,0048	0,0056	0,0052
3	2	-	8	+	0,0051	0,0050	0,0051
4	5	+	8	+	0,0078	0,0073	0,0076

Tabela 50: Resultados do planejamento fatorial 22 do composto de borracha B4. A - Ângulo de deriva, C - Carga, AC – Efeito de Interação e M – Média global dos testes.

Efeito [mg/ciclo]					Erro	Intervalo de confianca.
	М	А	С	AC	estimado [mg/ciclo]	α=10% [mg/ciclo]
	0,0052	0,0023	0,0021	0,0002	0,0002	0,0005

Das Tabelas de 43 a 50 observa-se que os compostos apresentam efeitos principais significativos pois seus valores são maiores que os respectivos intervalos de confiança, logo os parâmetros de carga e ângulo de deriva da

máquina de teste são válidos para o estudo do comportamento do desgaste dos compostos de borracha.

5.3 Análise dos Resultados de Desgaste dos Compostos de Borracha em Função da Formulação

A formulação de compostos de borracha inclui a seleção de ingredientes adequados para obter as propriedades necessárias na utilização final do produto.

A interação dos diferentes ingredientes nas propriedades do composto e sua resposta às condições operacionais é altamente não linear e na maior parte das vezes não é possível prever o comportamento quanto ao desgaste de um produto antes que este inicie seus testes de rendimento quilométrico em campo. Apesar disso, a partir das Figuras de 69 a 73, dos compostos B1, B2, B3 e B4, pode-se observar:

De um modo geral os resultados da taxa de desgaste específica em função da formulação dos testes em campo se aproximam dos resultados do teste de laboratório moderado (deriva 2 graus);

De acordo com a Figura 69, seguindo as informações da Figura 9, o aumento no nível de negro de fumo na formulação reduziu a taxa de desgaste específica nos testes em campo e nos testes em laboratório, sendo esta tendência um pouco menos acentuada no teste de laboratório com ângulo de deriva de 5°,

A Figura 70 mostra que o aumento na área superficial do negro de fumo tende a aumentar a taxa de desgaste específica média. Esta tendência é maior para o teste em laboratório com ângulo de deriva de 5°. Este comportamento pode ser o equivalente a passar o ponto de máximo da Figura 8;

De acordo com a Figura 71, o comportamento do desgaste tende a seguir o esperado pela literatura, um composto com maior histerese (maior tangente de delta) resiste mais ao desgaste;

De acordo com a literatura, BR é um polímero resistente ao desgaste. Na Figura 72 observa-se que o aumento na porcentagem de BR na formulação

tende a reduzir o desgaste, sendo este efeito mais pronunciado para o teste em laboratório com ângulo de deriva de 5°, e

De acordo com a literatura, SBR é um polímero resistente ao desgaste Na Figura 73, o aumento na porcentagem de SBR na formulação tende a reduzir o desgaste, sendo este efeito mais pronunciado para o teste em laboratório com ângulo de deriva de 2° e para o teste de campo.

5.4 Estudo com Diferentes Pavimentos

Depois de concluída a etapa de validação da máquina de testes de desgaste teve início o estudo comparativo do desgaste de composto de borracha em função de diferentes tipos de pavimento de rodovias brasileiras. Este trabalho foi feito em duas etapas. A primeira foi a análise estatística dos resultados para verificar a representatividade dos ensaios realizados, seguida de comparação dos resultados dos ensaios em laboratório com as medições de textura dos diferentes pavimentos.

A seguir serão discutidas cada uma das etapas realizadas.

5.4.1 Análise Estatística dos Dados

Foi elaborada tabela de análise de variância do composto B5 para uma distribuição F(3,4) 95%. A Tabela 51 apresenta os resultados para os diferentes pavimentos.

Hipótese: No teste de laboratório o composto B5 apresentou diferentes resistências ao desgaste em função dos diferentes pavimentos

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Таха	F(3,4) 95%
Entre os Tratamentos ST	1,27E-07	3	4,22E-08	7,7	6,6
Dentro dos Tratamentos SR	2,18E-08	4	5,45E-09		

Tabela 51: Análise estatística dos resultados de teste em laboratório do composto B5 com diferentes pavimentos através de uma distribuição F(3,4) 95%

A Tabela 51 apresenta taxa superior à distribuição F(3,4) a 95%, logo existem evidências (95% de chance) que viabilizam a aceitação da hipótese, ou seja, as diferenças entre os resultados podem ser atribuídas a diferenças entre tratamentos.

Uma vez confirmada a relevância estatística dos dados, foi feita a análise de seu comportamento quanto ao desgaste.

5.4.2 Classificação dos Pavimentos em Função do Desgaste

Para esta etapa do trabalho foi definido ajustar os parâmetros da máquina de testes de acordo com aqueles que obtiveram na fase de validação a correlação com os resultados dos testes em campo. Tal definição é importante porque a representação de um regime de desgaste mais severo pode alterar a classificação dos pavimentos em função do desempenho do composto de borracha B5.

Com os resultados em laboratório apresentados nas Figuras de 78 a 81 os pavimentos foram classificados em função do desgaste que proporcionam ao composto de borracha B5, este resultado é apresentado no histograma da Figura 85.



Figura 85: Taxa de desgaste específica por pavimento, composto de borracha B5, ângulo 2 graus, carga 8 kgf, velocidade 2 km/h (Tabela 39).

5.4.3 Classificação dos Pavimentos em Função da Textura

Os resultados de medição de macro e microtextura dos pavimentos estão apresentados respectivamente nos histogramas das Figuras 86 e 87.



Figura 86:Macrotextura em função do pavimento medida pela mancha de areia



Figura 87: Microtextura em função do pavimento medida pelo pêndulo britânico

Comparando as medições das Figuras 86 e 87 pode-se observar que em ambas as escalas de textura os pavimentos são classificados de modo semelhante, exceto pelo SMA, que apresenta comparativamente uma textura intermediária na escala macroscópica e também a menor microtextura do conjunto de pavimentos.

Comparando as medições de textura com os resultados de desgaste do teste em laboratório da Figura 85 observa-se que o desgaste sofrido pelo composto de borracha B5 é diretamente proporcional à microtextura do contra-corpo. Sendo obtidos nos testes com o pavimento SMA, de menor microtextura, o menor valor de taxa de desgaste específica. Por outro lado, os resultados com o pavimento TSD, de maior microtextura, praticamente dobram os valores da taxa de desgaste específica.

Os resultados apresentados mostram que em um pavimento em boas condições de conservação (ausência de buracos e irregularidades) a sua microtextura terá influência significativa no desempenho dos compostos de borracha utilizados na banda de rodagem dos pneus automotivos.

6 Conclusões

- A máquina de teste reproduziu o desgaste encontrado em ensaio em campo (ondas de Schallamach);
- 2. A máquina de teste apresentou correlação com os resultados em campo;
- Através do planejamento de experimentos observou-se a carga e o ângulo de deriva são adequados para o estudo do desgaste dos compostos de borracha;
- As taxas de desgaste mais elevadas foram obtidas com os maiores valores de carga e ângulo de deriva;
- Ao variar as condições operacionais de teste alterou-se o regime de desgaste de moderado para severo, alterando a classificação dos compostos em relação ao desgaste;
- O comportamento do desgaste dos compostos de borracha em função dos componentes da formulação é altamente não linear. No entanto, os parâmetros de formulação tendem a seguir o comportamento esperado pela literatura;
- 7. O estudo do desgaste do composto de borracha B5 contra diferentes pavimentos mostrou que o desgaste é diretamente proporcional à microtextura do contra-corpo, coerentemente com a literatura. O pavimento SMA, de menor microtextura, promoveu o menor valor de taxa de desgaste específica. Por outro lado, os resultados com o pavimento TSD, de maior microtextura, praticamente dobram os valores de desgaste; e
- 8. Em um pavimento em boas condições de conservação (ausência de buracos e irregularidades) a sua microtextura terá influência significativa no desempenho dos compostos de borracha utilizados na banda de rodagem dos pneus automotivos.

7 Trabalhos Futuros

- Estudar o efeito da temperatura na interface pneu pavimento;
- Análise por superfície de resposta do desgaste dos corpos-de-prova em função das condições operacionais da máquina de teste;
- Expandir o planejamento fatorial das condições operacionais usando a configuração de estrela;
- Desenvolver planejamento experimental para estudar efeito da macro e microtextura do pavimento no comportamento do desgaste dos compostos de borracha;
- Desenvolver planejamento experimental para estudar efeito dos parâmetros de formulação no comportamento do desgaste dos compostos de borracha;
- Estudar o desgaste de outros compostos de borracha em diferentes pavimentos de modo a interpretar possíveis alterações na classificação da resistência ao desgaste dos compostos de borracha em função da mudança de pavimento; e
- Estudar o comportamento quanto ao desgaste sob condição de pavimento molhado.

Referências Bibliográficas

ABE, M.M. **Projeto de uma Máquina para Ensaio de Desgaste de Pneus**. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2001)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-303-93 (1998)**: Standard Method for Measuring Frictional Properties Using The British Pendulum Tester. West Conshohocken: ASTM Standards, 1998. In: APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E867-97 (1997):** Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems. West Conshohocken: ASTM Standards, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-965-96 (2001):** Standard Test Method for Measuring Surface Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. West Conshohocken: ASTM Standards, 2001. In: APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

APS, M. Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica – Materiais, projeto e restauração**. São Paulo. Oficina de Textos, 2007.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., **Planejamento e otimização** de experimentos. Campinas, Editora da UNICAMP, 1995.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. Petrobrás, ABEDA, 2006.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistic for experimenters, an introduction to design, data analysis and model building. United States of America. John Wiley & Sons. 1978.

BHUSHAN, B. Introduction to tribology. United States of America. John Wiley & Sons. 2002.

BROWN, R. Physical testing of rubber. London. Chapman & Hall, 1996.

CARDOSO, F. A. **Dispositivo para ajuste de ponto de tangência de máquina de desgaste de pneus**. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2002)

CIULLO, R. N.; HEWITT, N. **The rubber formulary**. United States of America. William Andrew, 1999, PDL Handbook Series

COSTA, A. L. A. Caracterização do comportamento vibracional do sistema pneususpensão e sua correlação com o desgaste irregular verificado em pneus dianteiros de veículos comerciais. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DATTA, R. N. **Rubber curing systems**, United Kingdom. Smithers Rapra Publishing, 2001, Rapra Review Reports, v. 12, n. 12

GARRETT, T. K.; NEWTON, K.; STEEDS, W. **The motor vehicle**. Great Britain. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2001.

GENT, A. N. Engineering with rubber – How to design rubber components. Germany. Hanser Verlag, 2001

GENT, A. N.; WALTER, J. D. **The pneumatic tire**. Washington: National Highway Traffic Safety Administration, 2005.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992.

GROSCH, K. A.; ROTT, R. A new laboratory method to determine the traction and wear properties of tire tread compounds. KGK 12, 841-851 (1997).

HEISLER, H. **Advanced vehicle technology**. Great Britain. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2002.

HUNTER, R. N. **Bituminous mixtures in road construction**. London. Thomas Telford, 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1382:1996** – Rubber Vocabulary

JOAQUIM, C. R. O **Desenvolvimento de Máquina para Ensaio de Desgaste de Pneus contra Asfalto**. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Mecânica) -Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2001)

KATI, L. Estudo do desgaste de pneus contra asfalto. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2002).

KÖNIG, R. G., Estudo do desgaste de revestimentos em matrizes de recorte a frio de cabeças de parafusos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007

LE MAÎTRE, O.; SÜSSNER, M.; ZARAK, C. **Evaluation of tire wear performance**. SAE Technical Paper Series. International Congress Exposition. Detroit, Michigan, 1998

LEONARDO 1. Ms E e Codices Atlanticus e Forster II; op. Cit. Vinci, 1940

LEONARDO 2 . Vinci, sd

LEONARDO 3. C Forster f 132 v

LEONARDO 4. da Vinci, C Atl f. 198 v-a

LOWNE, R. W. The effect of road surface texture on tire wear. Wear 15, 57-70, 1970

MAIN ROADS WESTERN AUSTRALIA. **Pavements and Structures - Test method WA 310.1 - Pavement skid resistance: British pendulum method**. Disponível em <http://www2.mainroads.wa.gov.au/NR/rdonlyres/3515FE18-90D0-4EEC-AE32-956C23EDF717/0/wa310_1.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2009.

MARK, J., E.; ERMAN, B.; EIRICH, F., R. **The science and technology of rubber**. United States of America. Elsevier Academic Press, 2005

MORTON, M. Rubber technology, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1999

NAKATU, L. V. **Morfologia do Desgaste em Corpos-de-Prova**. 2006. 10 fotografias, p&b., digital. Microscopia realizada no Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da USP

OLIVEIRA, A.,T. **Projeto de uma Máquina para Ensaio de Desgaste de Pneus**. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2001)

PERSSON, B. N. J. **Rubber friction: role of the flash temperature**. Journal of Physics: condensed matter, London, v.18, n.32, (2006)

RIBEIRO, J.C. Estudo do Comportamento de Diferentes Compostos de Borracha no desgaste pelo asfalto . Iniciação Científica. (Graduanda em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2002)

RODGERS, B. **Rubber compounding – Chemistry and Applications**. United States of America. Marcel Dekker, 2004

SAKAI, H. **Tribology of tyre**. Journal of Japanese Society of Tribologists 3, 228-233 (2001)

SCHALLAMACH, A. Friction and abrasion of rubber. Wear, v.1, 384 - 417, 1957

SCHALLAMACH, A. **The load dependence of rubber friction**. Proceedings of the Physical Society. London, v.65, Section B, 657 - 661, 1951

SHAHIN, M. Y. **Pavement management for airports, roads and parking lots**. New York. Chapman & Hall, 1994.

SINATORA, A.; TANAKA, D. K. **As Leis do Atrito: Da Vinci, Amontons ou Coulomb?.** Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, v. 12, n.1, p. 31 – 34, out 2007.

SOUZA, L. G. Instrumentação de uma Máquina para Ensaio de Pneu contra Asfalto. – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2001)

VEITH, A. G. **The most complex tire pavement interaction: Tire wear**.1986. In: POTTINGER, M. G.; YAGER, T.J.**The tire pavement interface**, ASTM STP 929, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986

VEITH, A. G. Tire treadwear: The joint influence of Tg, tread composition and environmental factors. A proposed 'two mechanism' theory of treadwear. Polymer Testing 7, 177-207, 1987.

VEITH, A., G. **The wear of pneumatic tires**. Department of Special Programs and Department of Mechanical Engineering. University of Akron. 1982

WONG, J. Y. **Theory of ground vehicles**. United States of America. John Wiley & Sons, 2001

ZUCATO, I. Calçada de Lorena. 2009. 1 fotografia, color., digital

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1987, Tribology Series, v. 10.

ZUPPANI, A.,L.,A. Instrumentação de uma Máquina para Ensaio de Pneu contra Asfalto. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo (2001)

APÊNDICE A- MÉTODO PARA CONSTRUÇAO DA TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

De acordo com Box *et al.* (1978), antes de construir a tabela de análise de variância é importante organizar os dados do modo apresentado na Tabela A1

	40	Classificaç	ão dos Tra	tamentos	6
	1	2	3		k
	<i>Y</i> ₁₁	<i>Y</i> ₂₁	<i>Y</i> ₃₁		y_{k1}
Observações dentro do Tratamento	<i>Y</i> ₁₂	<i>Y</i> ₂₂	<i>Y</i> ₃₂		y_{k2}
	\mathcal{Y}_{1n_1}	y_{2n_2}	y_{3n_3}		${\mathcal Y}_{kn_k}$
Número de observações dentro do tratamento	n_1	<i>n</i> ₂	<i>n</i> ₃		n_k
Média do tratamento	\overline{y}_1	\overline{y}_2	\overline{y}_3		\overline{y}_k
Desvio do tratamento	$\overline{y}_1 - \overline{y}$	$\overline{y}_2 - \overline{y}$	$\overline{y}_3 - \overline{y}$		$\overline{y}_k - \overline{y}$

Tabela A1: Disposição dos dado	os experimentais para	a construção da tabela de	análise
	de variância		

De acordo com Box *et al.* (1978), a construção da tabela de análise de variância deve seguir os cálculos indicados na Tabela A2. Aonde a célula referente à taxa será comparada com o valor de uma distribuição F(k-1, N-k).

Onde, k : número de tratamentos N : número total de observações

		مام دام مام	
Tabela AZ: Calculos	para construção	da tapela de	analise de variancia.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Таха
Entre Tratamentos	$S_T = \sum_{t=1}^k n_t (\overline{y}_t - \overline{y})^2$	<i>k</i> –1	$S_T^{2} = \frac{\sum_{t=1}^{k} n_t (\bar{y}_t - \bar{y})^2}{k - 1}$	S_T^2 / S_R^2
Dentro Tratamentos	$S_{R} = \sum_{t=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{t}} (y_{ti} - \overline{y}_{t})^{2}$	N-k	$S_{R}^{2} = \sum_{t=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{t}} \frac{(y_{ii} - \overline{y}_{t})^{2}}{N - k}$	