



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



Faculdade de Engenharia Civil

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DE PNEUMÁTICOS NA TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS EM
PAVIMENTO FLEXÍVEL**

OTHON PEDRIEL PARMEGGIANI

UBERLÂNDIA – MG, JULHO DE 2018

OTHON PEDRIEL PARMEGGIANI

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Civil (FECIV), da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito exigido para a
conclusão do curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pires Leandro

UBERLÂNDIA – MG, JULHO DE 2018

FOLHA DE ASSINATURAS

OTHON PEDRIEL PARMEGGIANI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PRIMEIRO SEMESTRE DE 2018

Através do termo de compromisso firmado entre mim, Othon Pedriel Parmeggiani – discente do curso de Engenharia Civil, e o Dr. Rodrigo Pires Leandro - docente da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, fica firmada a realização da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pires Leandro

Uberlândia, de julho de 2018.

Assinaturas:

Othon Pedriel Parmeggiani – Discente

Dr. Rodrigo Pires Leandro – Professor Orientador

OTHON PEDRIEL PARMEGGIANI

**AVALIAÇÃO DE PNEUMÁTICOS NA TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS EM
PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso, requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora – Assinaturas

Dr. Rodrigo Pires Leandro – Professor Orientador

(Examinador – UFU)

(Examinador – UFU)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar aos meus pais Ivan e Zuleika e a minha irmã Letícia, pelo dom da vida e pelo amor incondicional em todas as etapas do meu processo de evolução. São eles quem fazem parte dos meus sonhos, da minha luta, da minha capacitação como ser humano e da realização dos meus projetos.

Aos meus familiares e amigos que, com sensibilidade, me motivaram nesta fase da minha vida e, sempre disponibilizaram compreensões mais do que positivas para realização desta graduação.

Ao meu orientador e professor Dr. Rodrigo Pires Leandro, inicialmente pela disposição em ajudar, depois pela paciente e zelosa orientação a cerca deste trabalho.

À todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram neste estudo e em minha formação como Engenheira Civil.

**“O saber é a razão de ser da existência do homem na Terra,
a primeira e a última de suas
tarefas.**

**Faça que o estímulo de consegui-lo te alente sem cessar,
porque nele está a verdadeira finalidade de tua vida.”**

Carlos Bernardo González Pecotche

RESUMO

Os pavimentos rodoviários requerem infraestrutura para que consigam suportar os esforços solicitantes em especial os causados pelos carregamentos de rodas que são transmitidos por diferentes tipos de pneumáticos e de eixo à estrutura do pavimento. Além das regulações de cargas por veículo e por eixo existe ainda a pluralidade de pneumáticos que não é levada em conta nos dimensionamentos de pavimentos. Então, a proposta desse trabalho foi fazer a análise da influência do tipo de pneumático no comportamento mecânico de uma estrutura típica de pavimento asfáltico rodoviário. Por meio do *software* ELSYM5 as análises mecanicistas com interação das características dos componentes das camadas do pavimento e das características do carregamento, analisou-se tensões, deformações e deslocamentos. Por fim, esses resultados foram comparados entre a utilização do pneumático 7,50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD) e do pneumático extralargo 385/65 R22,5 eixos simples (ES). A conclusão foi que o pneu extralargo é mais danoso em todos esforços citados.

Palavras-chave: carregamentos; esforços; eixo; pavimento asfáltico flexível; deslocamentos; tensões; deformações; limites legais de carga; *software* ELSYM5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de um pavimento flexível.	14
Figura 2 -Exemplo da propagação de tensões nas várias camadas que constituem o pavimento flexível.	14
Figura 3 - Esforços juntos a interfaces das camadas do pavimento.....	15
Figura 4 - Trinca por fadiga.	18
Figura 5 – Exemplo de afundamento em trilha de roda por deformação cisalhante.	19
Figura 6 -Descrições do pneumático.	23
Figura 7 - Espessuras das camadas utilizadas na inequações, método DNER.	27
Figura 8 - Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no método do DNER.	28
Figura 9 - Fluxograma de Dimensionamento Mecanístico.....	32
Figura 10 - Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento (LEKARP et al., 2000a).	33
Figura 11 - Fluxograma do método de trabalho.....	35
Figura 12 - Ilustrações dos esforços.....	36
Figura 13 - Eixo isolado dianteiro 10tf.	38
Figura 14 - Representação dos pontos de análise, das camadas e das configurações dos pneumáticos.....	39
Figura 15 - Comparativo de deslocamentos ponto superior da regularização (0,01 cm) sujeita a fadiga.	40
Figura 16 - Comparativo de tensões de tração no ponto superior do subleito (9,99 cm) sujeita a fadiga.	42
Figura 17 - Comparativo de deformações de compressão no ponto superior do subleito (40,01 cm) sujeita a deformação permanente.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Tipos de veículos e cargas por eixo.	21
Tabela 2 - Tipos de eixos, peso máximo permitido e tolerância de 10%.	22
Tabela 3 - Dados dos matérias e das camadas do pavimento asfáltico.	37
Tabela 4 – Taxa de deslocamento quanto aos tipos de pneus e comparativo de deslocamentos entre os tipos de pneus.	41
Tabela 5 - Taxa de tensões quanto aos tipos de pneus e comparativo de tensões entre os tipos de pneus.	43
Tabela 6 - Taxa de deformações quanto aos tipos de pneus e comparativo de deformações entre os tipos de pneus.	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO	11
1.2 PROBLEMÁTICA	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 OBJETIVO GERAL.....	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	13
2.1.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO	13
2.1.2 PRINCIPAIS DEFEITOS NO PAVIMENTOS FLEXÍVEL.....	17
2.2 VEÍCULOS DE CARGA	19
2.2.1 LIMITES LEGAIS	19
2.2.2. EIXOS COMERCIAIS.....	23
2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS.....	24
2.3.1 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXIVEIS DO DNER (DNIT)	26
2.3.2 MÉTODO MECANÍSTICO	28
2.3.3 MÉTODO MECANÍSTICO – EMPÍRICO	30
3.MÉTODO.....	34
3.1. O SOFTWARE	36
3.2. ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	36
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	39
5. CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICES	51

1.INTRODUÇÃO

1.1. BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

Pavimento ou calçamento é o termo designado a qualquer base horizontal de uma determinada construção, seja no meio interno ou externo, que serve de apoio e trânsito de corpos móveis (pessoas, animais, veículos, etc.). As estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga sem sofrerem dano excessivo dentro do período de projeto. Ao estudar a história da pavimentação, nota-se o avanço das civilizações em intensificar as economias através dos comércio, em integrar as culturas e em mobilizar as forças militares. Assim desde antigamente essa área da engenharia é fundamental para a estratégia econômica, social e de segurança de qualquer nação (BALBO, 2007).

As técnicas e os métodos na pavimentação foram gradualmente sendo desenvolvidas ao longo de várias contribuições de várias civilizações. Com os egípcios tem-se um breve indício de pavimentação com a implementação de drenos. A partir disso com os povos cartagineses e estoicos começaram os primeiros projetos com técnicas que levam em conta extensões, impacto social e objetivos da via, os quais foram posteriormente aproveitados pela civilização Romana em sua expansão além da Europa. Essas técnicas já aperfeiçoadas por dois mil anos serviram de base para pavimentação no Brasil Colônia (BALBO, 2007).

Nesse processo de aprimoramento das técnicas de construção de pavimentos evoluíram também os métodos para o dimensionamento. Inicialmente métodos além dos empíricos, os quais foram passados e melhorados de geração em geração. Com esse mesmo intuito de aprimorar o estudo dos pavimentos, surgem os métodos mecanicistas, que leva em conta o comportamento mecânicos do pavimentos a partir da aplicação da teoria elástica das multicamadas. Em suma, hoje se dimensiona pavimento tanto com um dos métodos ou a interpretação dos dois surgindo assim os métodos empírico-mecanicistas.

Conforme explanado acima entende-se, portanto, que a pavimentação avança assim como a humanidade. Vê-se, pois, que é uma relação proporcionar e onde há crescimento econômico, social e espacial há também evolução da pavimentação . É

preciso ressaltar a importância histórica desse setor da engenharia civil. Afinal, as grandes mudanças na pavimentação acarreta, positivamente, grandes mudanças num país ou numa civilização.

1.2 PROBLEMÁTICA

O tráfego rodoviário é muito abrangente quanto ao tipo de veículo e cargas transportadas, além do mais há diferenciações ainda maiores quando se leva em conta eixo de ação no veículo e o tipo do pneu a ser utilizado, desta forma é inevitável a degradação dos pavimentos. Assim, nota-se a relevância de estudos que buscam melhorar o desempenho das transmissões de cargas para os pavimentos rodoviários.

Em vista da mudança nos limites legais de cargas quanto ao peso bruto total e o peso por eixo fiscalizados pela Lei da Balança, no Brasil, a resolução 62/98 do CONTRAN autorizando a circulação do pneu extralargo do tipo 385/65R22,5 em eixo tandem para semi-reboque e reboque com suspensão pneumática para caminhões, auxilia na variação de pneumáticos a serem utilizados nas rodovias. Quanto a isso, se faz necessário explorar os efeitos desse pneu extralargo em eixos simples (ES) em comparação com o efeitos dos pneus comuns em eixos simples rodado duplo (ESRD).

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o objetivo de prever o comportamento dos pavimentos sob a atuação dos carregamentos de tráfego sob diferentes pneumáticos, faz-se necessário usar os conceitos da mecânica dos pavimentos para o entendimento das análises. Essas utilizam a teoria da elasticidade e consideram a estrutura do pavimento como um sistema de multicamadas, modeladas com comportamento elástico para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos gerados pelas cargas. As análises possibilitam ainda a avaliação qualitativa do uso de materiais, carregamentos, configuração de pneumáticos em vista do desempenho do pavimento.

Há segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários (ANFTR) necessidade de introdução no Brasil de pneus extralargos em rodado simples com vista que a fabricação se torne mais em conta financeiramente que os pneus padrões em rodados duplos.

Justifica-se assim, o uso de diferente tipos de pneumáticos junto a diferente tipos de cargas para demonstrar os efeitos que o tráfego acarreta sobre o pavimento, e assim possibilitar um estudo que indique as vantagens e desvantagens dos pneumáticos usados e o efeito da sobrecarga sobre o pavimento.

1.4 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é a avaliação do efeito do tipo de pneumático no comportamento de estruturas de pavimentos asfálticos em termos de tensões, deformações e deslocamentos para pavimentos rodoviários.

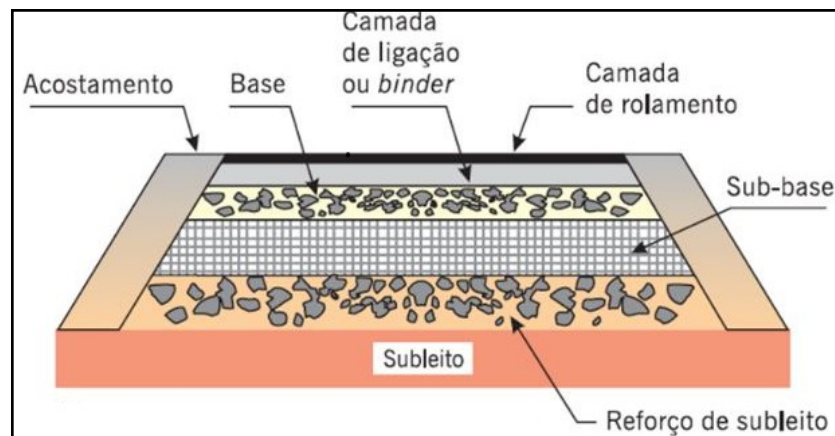
2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

2.1.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO

As estruturas de pavimentos asfálticos podem ser constituídas pelas camadas de revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. A camada de revestimento pode ainda ser dividida em camada de rolamento e em camada de ligação (binder) (BERNUCCI *et al.*, 2006). A Figura 1 mostra uma estrutura típica de pavimento asfáltico.

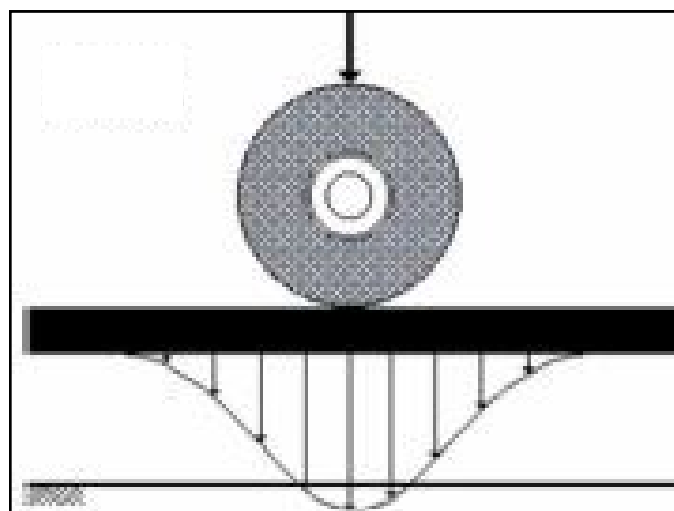
Figura 1 - Camadas de um pavimento flexível.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Quanto ao comportamento mecânico, no pavimento do tipo flexível as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga é distribuída de forma concentrada (DNIT, 2006). A Figura 2 mostra um exemplo típico da distribuição de tensões em um pavimento de comportamento flexível estruturada com a camada de rolamento, base e subleito.

Figura 2 -Exemplo da propagação de tensões nas várias camadas que constituem o pavimento flexível.



Fonte: Adaptado Guinzi (2016).

Nos pavimentos flexíveis as camadas com ligantes são constituídas por materiais betuminosos que conferem uma significativa deformabilidade ao pavimento. A camada superior de regularização, camada betuminosa que possui uma característica de ligação, constituída pela camada de desgaste atua resistente à tração, logo assegura uma resistência à fadiga. Por outro lado as camadas inferiores são constituídas por material granular não ligado e juntamente com o solo de fundação, conferem ao pavimento resistência às tensões de compressão. A Figura 3 mostra onde atua a tração e a compressão num perfil de pavimento asfáltico e flexível composto por camada de rolamento e base.

Figura 3 - Esforços juntos a interfaces das camadas do pavimento.



Fonte: Balbo (2007).

Para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se conhecer as propriedades dos materiais frente à repetição de carga e ao efeito do clima. A mecânica dos pavimentos é a disciplina da engenharia civil que trata dessa forma de entendimento do pavimento como um sistema em camadas no qual devem estar compatibilizadas as tensões e deslocamentos solicitantes com as propriedades dos materiais e espessuras das camadas. Esses conceitos devem ser utilizados no

dimensionamento da estrutura e condicionam a escolha dos materiais (MEDINA E MOTTA, 2005).

Por outro lado problemas construtivos, passagem das cargas e ações climáticas não previstas no dimensionamento, contribuem para o aparecimento de patologias que diminuem a qualidade funcional/estrutural dos pavimentos. É frequente observar o aparecimento de patologias antes do final do período de vida útil projetado, ou antes das datas previstas para manutenção. Essas patologias precoces geram desconforto ao usuário e custo de manutenção, que poderiam ser evitados com um dimensionamento mais eficaz e eficiente.

A variação térmica

É analisada desde o processo de estocagem, usinagem, transporte, e manuseio dos ligantes e agregados, pois a temperatura influi diretamente na composição química da mistura final que será compactada. Aponta-se também as mudanças climáticas da região, sazonalidade, períodos de calor excessivo, neve e degelo; que geram processos de dilatação e retração, modificando a estrutura. Busca-se sempre misturas para construção do pavimento com baixa suscetibilidade térmica, já que a temperatura é fator de grande influência na resistência final da estrutura.

A ação da água

Essa é significativa quanto está presente no interior da estrutura do pavimento. A presença de água no interior da estrutura do pavimento contribui para a ruína precoce do pavimento, nomeadamente devido à redução da capacidade resistente dos materiais granulares e do solo de fundação (SANTOS, 2009). A ação da água envolve normalmente a movimentação de materiais das camadas. Os exemplos de degradações ligados ao movimento de materiais são exsudação e subida de finos.

A subida de finos prevalece em pavimentos com problemas de drenagem e, consequentemente, excesso de água nas camadas que constituem o pavimento. As camadas do pavimento, durante a ação de carga do tráfego sob uma pressão de compressão, induz a água junto as pequenas partículas a transpor as camadas e

carrear os materiais, promovendo a subida de finos e a ausência de materiais que antes compunham as camadas.

O aparecimento de exsudações devido à migração de um excesso de ligante para a superfície decorre de ações climáticas desfavoráveis somado a uma deficiente formulação das camadas de desgaste.

A variação mecânica

É analisada por aspectos como a frequência e volume do tráfego, a distribuição deste na pista, os diferentes tipos de veículos, o número de eixos, a área de contato e as cargas transmitidas. O propósito de qualquer metodologia de dimensionamento é a de prever um tráfego de projeto e então os esforços a serem resistidos pela estrutura. Esses esforços do tráfego na estrutura do pavimento são justificados através de tensões que corresponde a propagação da carga em uma dada área, de deformações que são os efeitos de aplicação de carga e de deslocamento causado pela passagem da carga.

2.1.2 PRINCIPAIS DEFEITOS NO PAVIMENTOS FLEXÍVEL

Os pavimentos estão sujeitos a defeitos impostos pelo tráfego e pelo clima. Nesse sentido, ao se analisar os possíveis mecanismos de ruptura em pavimentos, deve-se notar que existem sítios geológicos e pedológicos diversos; diferentes condições climáticas e morfológicas; diferentes limites legais de carregamento entre países; diferentes materiais utilizados na construção, além de tradições construtivas e de projeto muito variadas (BALBO, 2007). Assim, o consenso num método de dimensionamento mecanicista de pavimentos é complexo.

Os principais defeitos estruturais nos pavimentos asfálticos flexíveis são o trincamento por fadiga na fibra inferior da camada asfáltica e a deformação permanente em trilha de roda que pode ser resultante do acúmulo de deformações em todas as camadas.

O trincamento nos revestimentos asfálticos podem ocorrer tanto nas fibras inferiores do revestimento asfáltico, propagando-se por toda a espessura até o surgimento das

trincas na superfície, quanto no topo do revestimento devido ao surgimento de tensões críticas nas fibras superiores da camada (BALBO, 2007).

Especificamente quanto ao trincamento por fadiga, este é decorrente da solicitação contínua dos materiais da fibra inferior do revestimento asfáltico em tensão inferior à de ruptura. Esses materiais sofrem alterações de sua estrutura interna que levam a perda de suas características estruturais originais de tal modo que, as solicitações repetidas resultam em microfissuração progressiva, em que a soma de pequenas deformações culminam na fissura e a formação da trinca (Figura 4).

Figura 4 - Trinca por fadiga.



Fonte: Motta (2003).

O acúmulo de deformação permanente de cada camada do pavimento ou de uma camada em específico resulta nos afundamentos nas trilhas de roda e geralmente é visível na camada de rolamento. Contudo outras camadas podem estar comprometidas. Esse tipo de manifestação patológica pode comprometer a segurança e o conforto do usuário devido às irregularidades que caracterizam esse defeito e pela possibilidade de acúmulo de água em dias de chuva. Nesse sentido, a

deformação permanente em trilha de roda compromete o desempenho dos pavimentos asfálticos (MOURA 2010).

Para Balbo (2007) esse tipo de defeito está associado à ruptura funcional, ou seja, à perda de qualidade de rolamento, sendo mais evidenciada em situações onde há baixa resistência de camadas inferiores ou, ainda, quando o fluxo de veículos comerciais é canalizado em faixas de rolamento estreitas que utilizam materiais dúcteis na camada de revestimento. Desse modo, uma baixa qualidade de compactação das camadas ou um maior índice de vazios do que o estipulado em projeto pode ser uma das causas. A Figura 5 mostra um exemplo de afundamento em trilha de roda causado por deformação cisalhante no revestimento asfáltico.

Figura 5 – Exemplo de afundamento em trilha de roda por deformação cisalhante.



Fonte: Franco (2007).

2.2. VEÍCULOS DE CARGA

2.2.1 LIMITES LEGAIS

Em 1961, começa a vigorar através do decreto federal n.50.903/61 os limites legais de carga por eixo junto a Lei da Balança. Em 1968 junto ao Decreto Federal 62.127/66, regulamenta a Lei n.5.108/66, que altera o Código Nacional de Transito (Contran) em que os pesos foram fixados:

- 5t eixo dianteiro;
- 10t eixo isolado;
- 8,5t eixo tandem;
- 10t peso bruto total.

Com a Lei n.7408/85 houve a introdução de 5% de tolerância por peso no eixo e no peso bruto total. Em seguida com o Decreto Federal n.98.933/90 o eixo dianteiro passou a 6t. Em 1998, com a Resolução n.104 houve a alteração no Código de Trânsito Brasileiro da tolerância por eixo de 5% para 7,5%. Recentemente, com a Lei n.13.103/2015 que através do artigo 16 que altera a Lei 7.408/85, aumenta a tolerância de 7,5% para 10% da carga no eixo, embora mantém a tolerância de 5% do peso bruto total da carga do veículo.

Os veículos que trafegam no Brasil têm que seguir normas impostas pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) especificamente o estabelecido na Resolução n. 210 de 2006 e n. 526 de 2015. Na Tabela 1 verifica-se os tipos de veículos que circulam no país e limite legal de carga por eixo mais o somatório bruto total do veículo.

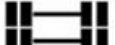
Tabela 1 -Tipos de veículos e cargas por eixo.

CARGA LEGAL (DNER)								
CLASSE / TIPO			CONFIGURAÇÃO	TIPOS DE EIXOS				Σ
				1º	2º	3º	4º	
VEÍCULOS LEVES	CARROS DE PASSEIO							
	UTILITÁRIOS (PICK-UPS E FURGÕES)		 					
ÔNIBUS	ÔNIBUS ≥20			4,0	7,5			11,5
	TRIBUS							
VEÍCULOS COMERCIAIS	CAMINHÕES	CAMINHÃO LEVE (608 e F4000)	2C LEVE 	2,0	4,0			6,0
		CAMINHÕES MÉDIOS E PESADOS	2C 	6,0	10,0			16,0
			3C 	6,0	17,0			23,0
			4C 	6,0	25,5			31,5
		CAMINHÕES COM SEMI-REBOQUE (CARRETAS)	2S1 	6,0	10,0	10,0		26,0
			2S2 	8,0	10,0	17,0		33,0
			2S3 	6,0	10,0	25,5		41,5
			3S2 	6,0	15,0	17,0		38,0
			3S3 	8,0	15,0	25,5		48,5
		CAMINHÕES COM REBOQUE (ROMEU E JULIETA)	2C2 	6,0	10,0	10,0	10,0	36,0
			2C3 	6,0	10,0	10,0	15,0	41,0
			3C2 	6,0	15,0	10,0	10,0	41,0
			3C3 	8,0	15,0	10,0	15,0	48,0
		"TREMINHÃO"	3C4 	6,0	17,0	17,0	17,0	57,0

Fonte: Resolução nº 12/98 do CONTRAN (1998).

A Tabela 2 abaixo mostra os tipos de eixos, o peso máximo permitido e o peso máximo com mais 10% de tolerância.

Tabela 2 - Tipos de eixos, peso máximo permitido e tolerância de 10%.

TIPOS DE EIXOS	CONFIGURAÇÃO DE EIXOS	PESO MÁXIMO PERMITIDO (t)	PMP + (10%) (t)
EIXO SIMPLES COM RODAGEM SINGELA		6	6,6
EIXOS SIMPLES COM RODAGEM DUPLA (1,2<d≤2,4m)		10	11
EIXO DUPLO DIRECIONAL COM RODAGEM SINGELA (1,2<d≤2,4m)		12	13,2
EIXO DUPLO DIRECIONAL COM RODAGEM SINGELA (TIPO EXTRALARGO)		17	18,7
EIXO DUPLO SENDO UM COM RODAGEM DUPLA (d≤1,2m)		9	9,9
EIXO DUPLO SENDO UM COM RODAGEM DUPLA (TANDEM) (1,2<d≤2,4m)		13,5	14,85
EIXO DUPLO COM RODAGEM DUPLA (NÃO TANDEM) (1,2<d≤2,4m)		15	16,5
EIXO DUPLO COM RODAGEM DUPLA (TANDEM) (1,2<d≤2,4m)		17	18,7
EIXO DUPLO COM RODAGEM DUPLA (TANDEM) (≥2,4m)		20	22
EIXO TRIPLO COM RODAGENS DUPLAS (TANDEM) (1,2<d≤2,4m)		25,5	28,05
EIXO TRIPLO SENDO UMA RODAGEM SINGELA E DUAS DUPLAS (1º EIXO ≥2,4m)		27	29,7
EIXO TRIPLO COM RODAGENS DUPLAS (TANDEM) (≥2,4m)		30	33

Fonte: Adaptado CONTRAN (1998).

2.2.2. EIXOS COMERCIAIS

A fabricação do pneu leva em conta o padrão internacional. O primeiro número grafado no pneu indica a sua largura em polegadas ou em milímetros. O segundo número aparece em pneus com relação altura/largura menor do que 1, então, a seguir vem a relação em porcentagem da altura do pneu pela largura. A presença da letra R (radial) ou D (diagonal) indica construção das lonas do pneu e o último número é o diâmetro interno (aro) do pneu em polegadas (Figura 6). A seguir possui alguns exemplos de descrições dos pneus:

- 7,50 R15;
 - pneu radial com 7,5 polegadas de largura nominal da seção e aro de diâmetro de 15 polegadas;
- 385/65 R22,5;
 - pneu radial com 385 milímetros de largura nominal da seção, com 65 de quociente percentual entre altura e largura da seção e aro com diâmetro nominal de 22,5 polegadas.

Figura 6 -Descrições do pneumático.



Fonte: Adaptado do Pneusmart (2018).

No Brasil, a resolução 62/98 do CONTRAN autoriza a circulação do pneu extralargo do tipo 385/65R22,5 em eixo tandem para semi-reboque e reboque com suspensão pneumática para caminhões. Por definição, pneu extralargo largura de rolagem 356 mm (14") ou mais e diâmetro nominal do aro entre 560 e 610 mm (22 a 24"). Segundo Perdomo e Nokes(1993) os pneus 16R22,5 e o 18R22,5 são os mais usuais, contudo esses pneus estão sujeitos aos caminhões que transitam fora da rodovia. Nesse contexto, a Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários (ANFTR) tem defendido nos últimos anos a introdução no Brasil das rodas simples dotadas de pneus extralargos, em substituição às rodas duplas convencionais em vista que a fabricação de um pneu extralargo fica menos oneroso que as rodas duplas convencionais (FERNANDES JR. *et al.* , 1994).

Nos estudos de Bonaquist *et al.* (1989), em que experimentaram os efeitos da pressão de inflação e da carga por eixo, chegou-se conclusão de nenhuma influente imponência quanto ao tipo de pneu sobre as respostas do pavimento. Os efeitos da pressão de inflação dos pneus sobre os pavimentos são parecidos, no entanto os pneus radiais levam pequena vantagem para os diagonais no quesito de menor deterioração quanto maior pressão de enchimento.

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Define-se empirismo por “conhecimentos práticos provenientes de experiências”. Então, o dimensionamento empírico de pavimentos se limita a prever espessuras ideais baseados em experiências anteriores repetidas em campo.

Balbo (2007) afirma que dimensionar um pavimento significa determinar as espessuras das camadas e os tipos de materiais a serem utilizados em sua construção, de modo a conceber uma estrutura capaz de suportar um volume de tráfego preestabelecido, nas condições climáticas locais, oferecendo o desempenho desejável nos seus requisitos básicos.

O dimensionamento de pavimentos baseia-se em métodos que vêm se desenvolvendo há algumas décadas. No passado, o dimensionamento era feito de uma forma totalmente empírica, empregava-se a mesma espessura de pavimento

sobre qualquer solo de fundação. Com o passar do tempo buscou-se soluções e novas práticas compatíveis com o solo de fundação da estrutura e com as características do tráfego para a implementação de um método de dimensionamento.

Segundo Brito & Graeff (2009) os métodos empíricos consideram somente dois fatores: a resistência do solo do subleito (determinada através do ensaio CBR) e o volume de tráfego de projeto. E o dimensionamento previne apenas a ruptura por deformação permanente, patologia conhecidas como “trilhas de roda”.

Para Neto (2004) a vantagem dos métodos empíricos é a facilidade de aplicação, pois os ensaios exigidos são simples e não requerem aparelhagem sofisticada. Por outro lado, limitam-se nas condições de contorno (materiais de construção, clima da região, condições de tráfego, etc.), não permitindo uma generalização adequada para outras regiões, novos materiais e diferentes cargas de tráfego.

O ponto desfavorável do empirismo é a influência da interpretação humana nos dados obtidos. Tendo em vista que a observação empírica não é suficiente à alguns modelos de previsão no comportamento de estruturas de pavimentos, pesquisadores buscam desenvolver modelos matemáticos e probabilísticos diminuindo a interpretação humana e aumentando a exatidão dos resultados.

Para Neto (2004), órgãos rodoviários em todo o mundo começaram a utilizar métodos de dimensionamento de pavimentos concebidos de duas maneiras distintas: através de experiências de campo com observação do desempenho dos pavimentos ao longo do tempo (métodos empíricos) ou a partir da aplicação de uma teoria elástica de multicamadas considerada adequada para a interpretação do comportamento mecânico do conjunto pavimento-subleito (métodos mecanísticos).

O dimensionamento de pavimentos de maneira mecanicista é uma tarefa complexa que exige grande quantidade de variáveis como dados de entrada. Os dados de volume de tráfego, características do carregamento e de clima são fundamentais para o dimensionamento de um pavimento asfáltico. O objetivo é que os pavimentos sejam duráveis servindo ao usuário com segurança, conforto e economia.

Segundo Brito & Graeff (2009), somente na década de 90 que foi introduzido o conceito mecanístico-empírico (ME) para dimensionamento de pavimentos. No

entanto, ainda há um grande número de países que utilizam métodos puramente empíricos, empírico-analíticos ou catálogos de dimensionamento para o projeto de pavimentos.

No Brasil, o método normatizado é semi-empírico do antigo DNER. Este método é uma adaptação do método do corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, com resultados da pista experimental da AASHTO. Franco (2007) ressalta que o método mecanístico-empírico ainda é pouco utilizado no Brasil, primeiramente, pela tradição do uso dos métodos empíricos; depois pela falta de uma metodologia de simples compreensão para o dimensionamento que permita análise de resultados confiáveis.

2.3.1 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO DNER (DNIT)

No Brasil, o método semi-empírico mais difundido é o do DNIT (antigo DNER), elaborado pelo Eng. Murilo Lopes de Souza em 1966, com última edição em 1981. Esse é embasado em métodos desenvolvidos pelo exército dos EUA, a partir de correlações empíricas e observações da pista experimental da AASHTO.

O método do DNER baseia-se fundamentalmente nas características de suporte do solo de fundação e dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, bem como nos parâmetros de tráfego. Atende à limitação de deformações permanentes excessivas e de tensões que possam provocar a ruptura por cisalhamento dos solos de base, sub-base e subleito. Contudo, a limitação das deformações recuperáveis ou resilientes, cuja repetição sob ação do tráfego provoca a ruptura por fadiga dos revestimentos asfálticos, não é considerada (PINTO, 1991).

Esse método utiliza ábacos, tabelas e equações para dimensionar a espessura das camadas do pavimento. A primeira etapa do procedimento é a determinação do número de solicitações do eixo padrão (Número N) e a verificação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais disponíveis para as demais camadas geotécnicas por meio da avaliação dos resultados dos ensaios de ISC (Índice de Suporte Califórnia). A segunda etapa é a determinação das espessuras de cada uma das

camadas em função do ISC e do tráfego (número N) pela utilização do ábaco da Figura 8 (p.28). A Figura 7 mostra esquematicamente uma estrutura de pavimento flexível e as espessuras a serem determinadas pela utilizações das inequações (1), (2) e (3).

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (1)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (2)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{REF} \geq H_m \quad (3)$$

Onde:

K_R : coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

R : espessura do revestimento;

K_B : coeficiente de equivalência estrutural da base;

H_{20} : espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base (pelo ábaco da Figura 8);

K_S : coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} : espessura da sub-base;

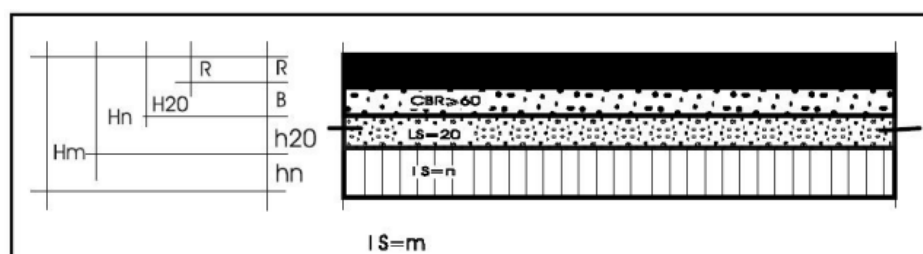
H_n : espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito pelo ábaco da Figura 8;

K_{REF} : coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

h_n : espessura do reforço do subleito;

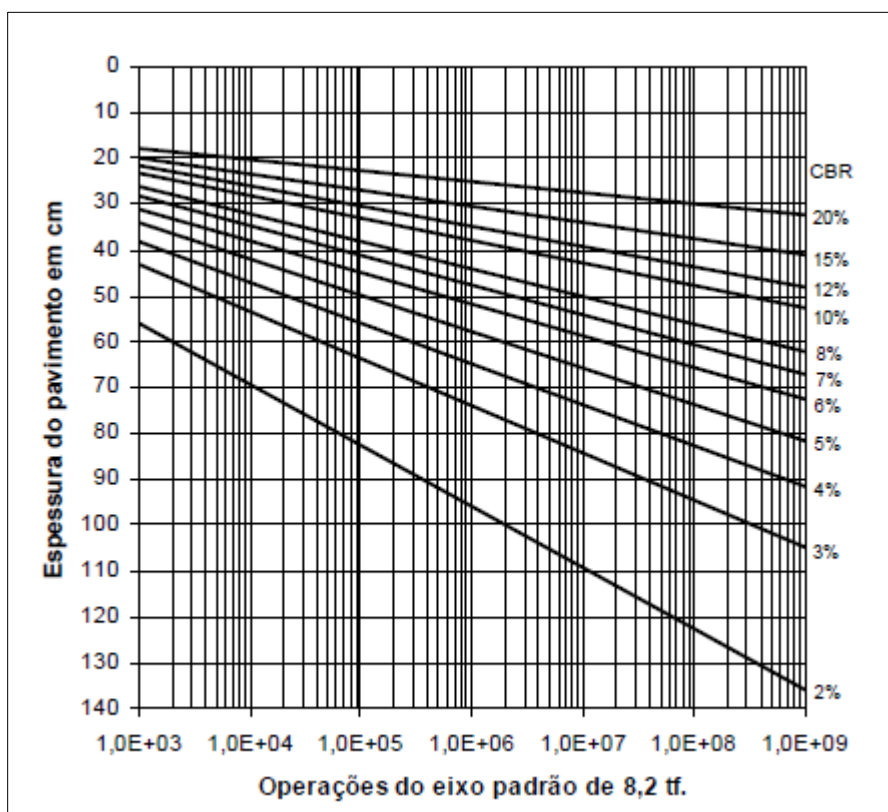
H_m : espessura total de pavimento necessária para proteger um material com CBR igual a $m\%$ (ábaco da Figura 8).

Figura 7 - Espessuras das camadas utilizadas nas inequações, método DNER.



Fonte: Adaptado DNIT (2006).

Figura 8 - Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no método do DNER.



. Fonte: Adaptada de DNIT (2006).

2.3.2 MÉTODO MECANÍSTICO

O método puramente mecanicista é uma tarefa ainda incerta na evolução dos processos de dimensionamento de pavimentos já que para uma pluralidade de características de diferentes países, regiões e sub-regiões, existe uma pluralidade de especificações e características climatológicas, do tráfego operante, materiais disponíveis, etc., sendo quase inviável defini-las somente com modelos matemáticos. Por outro lado, as vantagens dos métodos mecanicistas é a melhoria da confiabilidade do projeto e da capacidade de prever o desempenho do pavimento, bem como, a viabilidade de extrapolar os dados limitados de campo e laboratório através de meios probabilísticos.

Segundo Brito e Graeff, (2009), um método de dimensionamento é dito mecanístico (ou analítico) quando utiliza uma teoria para prever as tensões e deformações

provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as tensões resistentes dos materiais.

A utilização dos métodos empíricos de dimensionamento predominou até a década de 1980, quando os métodos empírico-mecanicistas entraram em cena. Coutinho (2011) afirma que a 1ª Conferência Internacional de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos realizada em 1962, na Universidade de Michigan, é considerada marco do início do desenvolvimento das metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos conhecidas como mecanísticas ou mecanicistas.

No Brasil, os conceitos da Mecânica dos Pavimentos já são conhecidos, estudados e aplicados desde a década de 1970. Ensaio de carga repetida de solos e materiais de pavimentação são realizados desde a mesma época. Uma primeira proposta de método mecanicista de dimensionamento de pavimentos asfálticos novos foi feita por Franco (2007) acredita que esses métodos mecanísticos trouxeram muitos benefícios às análises de pavimentos brasileiros, tais como: a utilização de novos materiais que não poderiam ser aproveitados pelas especificações tradicionais; a avaliação do tráfego por meio de uma composição de eixos e não pela equivalência de eixos; a verificação de quais parâmetros da estrutura que devem ser melhorados, não apenas a espessura, mas também o módulo da camada; e a simulação do efeito climático nos materiais.

Franco (2007) considera imprescindível as observações do comportamento dos pavimentos no campo de trechos experimentais ou de simuladores de tráfego para dar mais confiabilidade as simulações estatísticas desenvolvidas. O autor cita a pesquisa americana LTPP (*Long Term Pavement Performance*) de instrumentação e acompanhamento de diversas seções de rodovias americanas. Este projeto formou um grande banco de dados com detalhes e informações das propriedades dos materiais, das estruturas, do tráfego atuante, das condições climáticas e demais informações relacionadas ao desempenho dos pavimentos.

Para Bavaresco (2010) citando Medina e Motta (2005), a tendência mundial é o estabelecimento de métodos de dimensionamento mecanísticos tanto para pavimentos flexíveis e rígidos, novos ou restaurados, pois utilizam as ferramentas da

análise estrutural no cálculo de tensões e deformações e determinam os mecanismos de fadiga e de deformabilidade. Os parâmetros experimentais do modelo matemático são determinados no laboratório e no campo. A dose de empirismo remanescente prende-se principalmente à correta avaliação da ação do tráfego.

2.3.3 MÉTODO MECANÍSTICO – EMPÍRICO

No Brasil, a maioria dos métodos utilizados foram desenvolvidos no exterior, em locais com características ambientais e de materiais bastante diferentes das encontradas aqui. Assim, um dimensionamento mais confiável às características brasileiras é possível através do método mecanístico-empírico que considera dados regionais característicos do país, somado a experiência dos técnicos e pesquisadores brasileiros com os tais métodos existentes em outros países.

Os principais fatores sugeridos por Coutinho (2011), que levaram ao desenvolvimento do método mecanístico - empírico foram: a construção do conhecimento sobre as análises mecânicas de tensões e deslocamentos, a caracterização física e mecânica detalhada dos materiais, o desenvolvimento de ensaios não destrutivos dos pavimentos, a utilização de ensaios com tráfegos acelerados e o acúmulo de experiências durante décadas nas práticas de construções rodoviárias.

No método empírico-mecanicista, segundo Franco (2007), pode-se usar a teoria da elasticidade para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos, considerando os materiais segundo dois comportamentos tensão-deformação distintos: comportamento elástico linear e comportamento elástico não-linear. No comportamento elástico linear, o Módulo de Resiliência de um determinado material não apresenta variação ao longo de toda a espessura da camada constituída pelo mesmo, ao contrário do que ocorre quando se considera o comportamento elástico não-linear em que o Módulo de Resiliência do material pode variar ao longo da espessura, sendo então dependente da variação do estado de tensões a que está submetido (MOTTA, 2003).

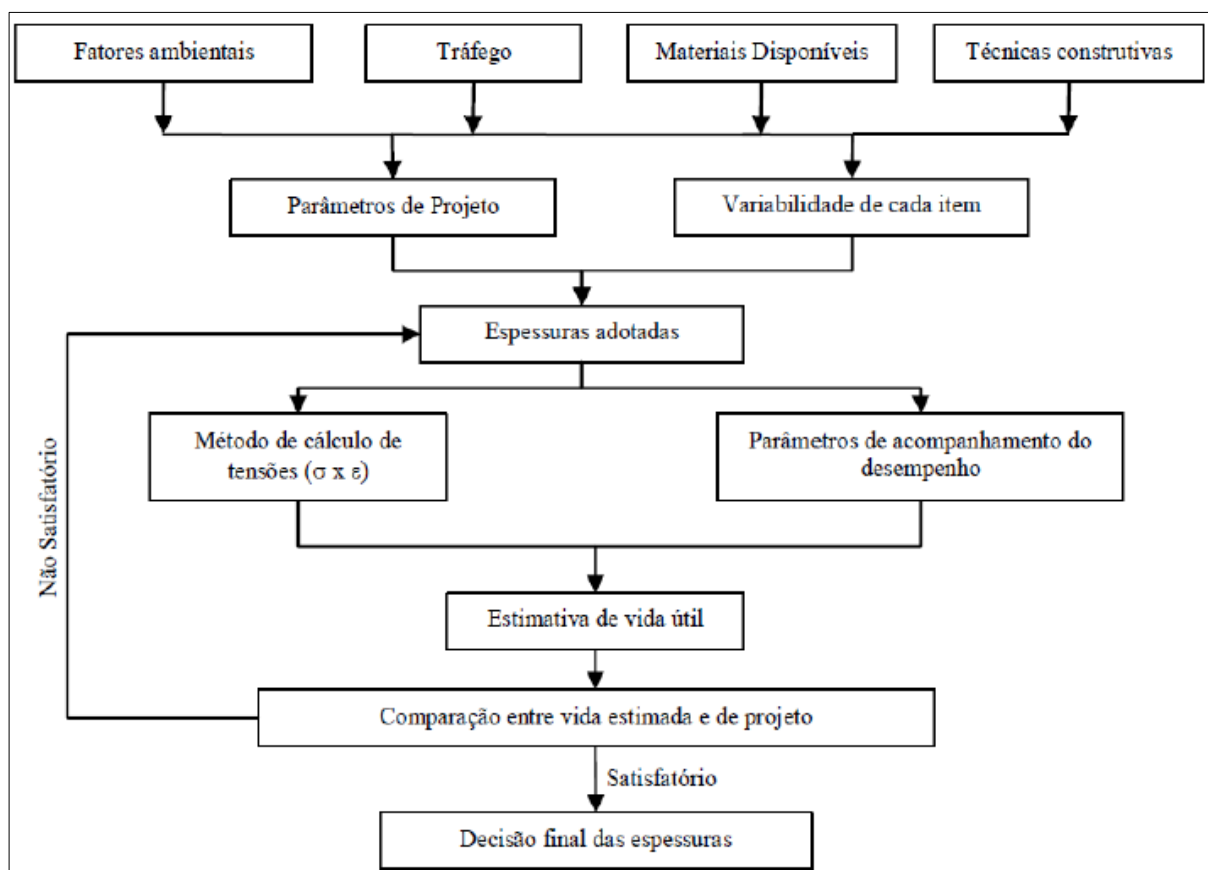
Brito e Graeff (2009) afirmam que, por esse tipo de análise, tem-se um panorama de comportamento da estrutura quando solicitada, possibilitando modificações quanto à

natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas. Ao analisar a estrutura do ponto de vista mecanístico, pode-se alterá-la de modo a proporcionar um desempenho adequado de cada um dos materiais do pavimento, para que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que a solicitação seja demasiada em uma das camadas de modo a levá-la precocemente à ruptura.

A parcela empírica dos métodos empírico-mecanicista, fica por conta de fatores de calibração que correlacionam a resposta das estruturas reais com os modelos de previsão de desempenho. Estes fatores fornecem subsídio para que os projetistas se certifiquem de que os resultados são coerentes com o comportamento de estruturas em serviço. A dificuldade fica, naturalmente, na determinação destes fatores que, muitas vezes, podem levar a significativas mudanças no projeto com pequenas variações nos coeficientes (BRITO & GRAEFF, 2009). Franco (2007) frisa que, apesar do avanço das pesquisas e das técnicas de ensaios no campo e no laboratório, esses fatores de calibração empíricos ainda não deixaram de ser utilizados, considerando-os aspecto limitante do método mecanístico.

A Figura 9 apresenta o fluxograma de Motta (1991) de um método mecanístico e que segundo Coutinho (2011) são aplicáveis a vários métodos ditos mecanísticos–empíricos que se diferenciam entre si por aspectos tais como a técnica utilizada para as análises de tensão–deformação, os critérios de desempenho adotados e os fatores campo-laboratório. A Figura em questão começa com vários fatores essenciais para o dimensionamento duma via, segue para os parâmetros desses fatores e do projeto, após isso se adota uma espessura na qual será analisadas as tensões e deformações, caso o dimensionamento atenda a vida útil adotada em projeto, o pavimento está dimensionado, senão o projetista volta a adotar outra espessura até que atenda a vida útil de projeto esperada seja atendida.

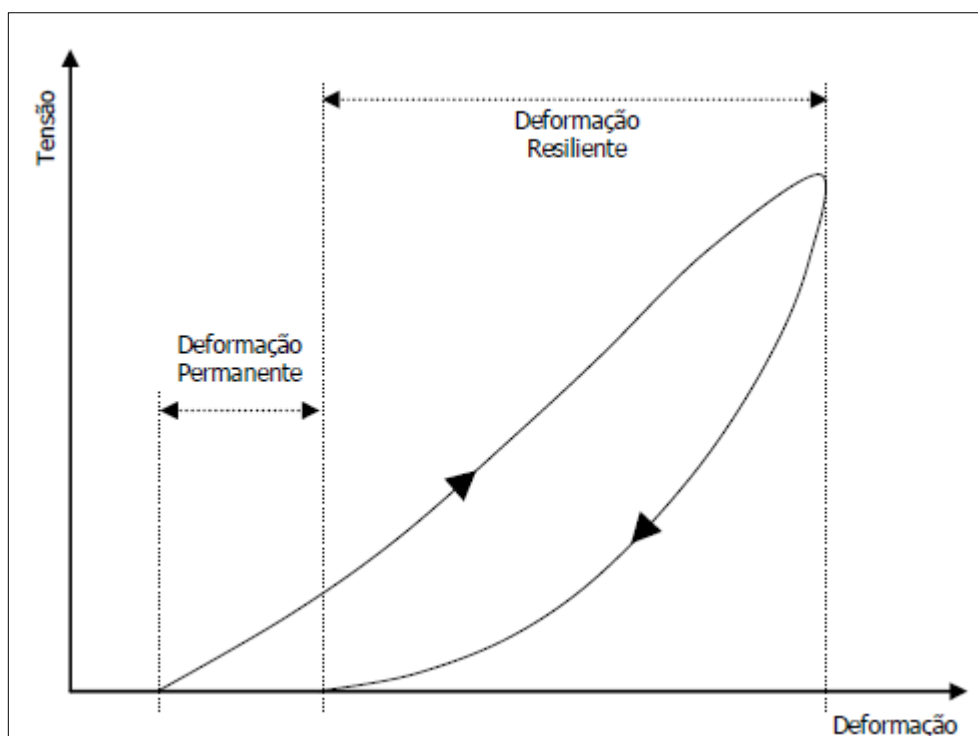
Figura 9 - Fluxograma de Dimensionamento Mecânico.



Fonte: Motta (1991).

Segundo Franco (2007), a maioria dos materiais que compõem a estrutura de um pavimento não apresenta um comportamento elástico puro, pois se observa o acúmulo de deformações permanentes com a aplicação de cargas. A Figura 10 apresenta o comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento. Parte da deformação que ocorre na estrutura é recuperável e chamada normalmente de resiliente, e parte não se recupera, sendo chamada de permanente ou plástica.

Figura 10 - Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento.



Fonte: LEKARP *et al.* (2000 apud FRANCO, 2007).

O comportamento mecânico dos materiais utilizados na pavimentação é bastante complexo de se modelar e, por isso, seu estudo deve ser dividido pelos tipos de materiais disponíveis como: misturas asfálticas, granulares, lateríticos, argilosos ou cimentados quimicamente.

Muitos métodos de dimensionamento consideram a solução pela elasticidade linear, apesar do comportamento da maioria dos materiais de pavimentação sob carregamento repetido ser comprovadamente elástico não linear, como é o caso dos materiais granulares e dos solos finos. A escolha pela solução da elasticidade linear se faz pelos seguintes motivos (MOTTA, 1991):

- É comum admitir um modelo elástico linear para as misturas asfálticas, para uma determinada temperatura;
- A teoria da elasticidade linear tem sido a base para a maior parte das aplicações práticas, podendo ser utilizada com um grau de confiança razoável,

principalmente quando o pavimento possui espessas camadas asfálticas ou camadas cimentadas;

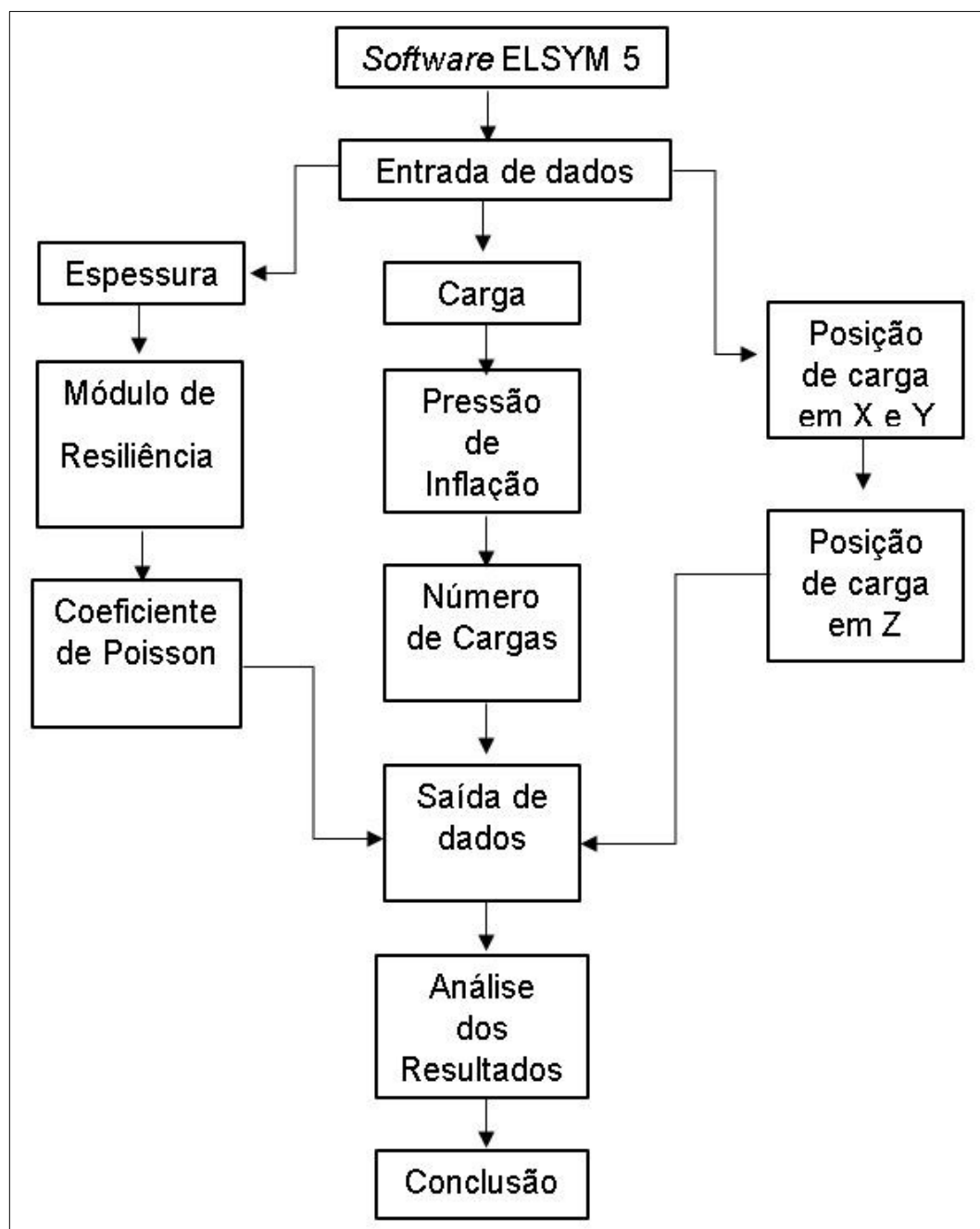
- Os parâmetros necessários para a análise podem ser facilmente obtidos com os recursos disponíveis em laboratórios de solos existentes no Brasil.

O módulo de resiliência vem sendo utilizado nas análises mecânicas por representar melhor o comportamento da estrutura dos pavimentos. Entretanto, o módulo de resiliência não é um parâmetro constante ou fixo para a maioria dos materiais de pavimentação. Assim Coutinho (2011), ressalta que nem sempre o comportamento do material é linearmente-elástico, mas muitas vezes é elástico não linear, ou plástico, ou viscoso ou mesmo a combinação variada destes fatores. Estes comportamentos diferenciados do material obrigam a busca de modelos empíricos que os descrevam em função do módulo de resiliência, tensões e deformações.

3. MÉTODO

A Figura 11 mostra o fluxograma do método adotado para a elaboração desse trabalho. Esse especifica os dados de entrada no *software* ELSYM5 que serão apontados no item 3.2. A seguir se tem a saída de dados compostos por tensões, deformações e deslocamentos que subsidiará a análise de dados e a conclusão desse trabalho.

Figura 11 - Fluxograma do método de trabalho.



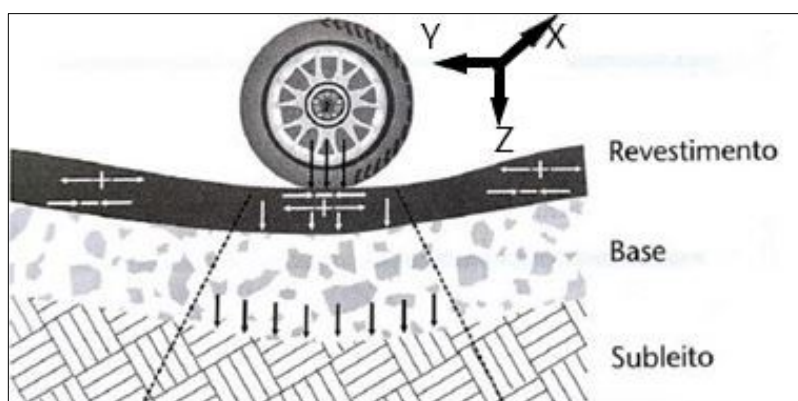
Fonte: Autor (2018).

O propósito que se almeja nesse trabalho é de concluir qual pneumático transmite menos esforços a uma estrutura de pavimento, seja o pneu 385/65 R22,5 ou o pneu 7,50 R15 e o cenário de comparação acontece numa estrutura de pavimento flexível.

3.1. O SOFTWARE

O ELSYM 5 é um programa de análise elástica linear de até 5 camadas que permite a avaliação de uma estrutura levando em conta a espessura da camada, o módulo de resiliência, o coeficiente de Poisson, a carga por roda, o raio da carga circular, a pressão de inflação do pneu, números de cargas e suas localizações. Além disso, pode-se especificar as posições de análises nos eixos X, Y e Z da estrutura. Por fim, as respostas do pavimento são definidas em termos de tensões, deformações e deslocamentos. A Figura 12 mostra um desenho esquemático dos esforços no pavimento.

Figura 12 - Ilustrações dos esforços.



Fonte: Adaptado Balbo (2007).

As tensões e deformações negativas são de compressão e as positivas são de tração. O eixo Z é relacionado à profundidade (vertical) e os eixos X e Y são relacionados, respectivamente, à transversal e longitudinal da faixa de rolamento (horizontais).

3.2. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para a realização da análise paramétrica fixou-se as características dos materiais e as espessuras das camadas estruturais e variou-se a configuração de carregamento. A Tabela 3 mostra os dados que foram inseridos no *software* ELSYM5, sendo eles camada, espessura, material utilizado, módulo de resiliência e coeficiente de Poisson. Os materiais escolhidos foram: concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) para o

revestimento, brita graduada simples (BGS) para a base e solo argiloso para o subleito. O material e a espessura foram adotados, no entanto o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson foram obtidos do material do DER/SP (2006). Quanto aos materiais escolhidos pelo autor para o perfil do pavimento procurou-se obter um conjunto de frequente uso na pavimentação rodoviária do Brasil e de módulo de resiliência que decresce no sentido do revestimento até o subleito. Para adotar essa espessura se levou em conta um tráfego de classe média de carga.

Tabela 3 - Dados dos materiais e das camadas do pavimento asfáltico.

Camada	Espessura	Material	Módulo de Resiliência	Coeficiente de Poisson
	(cm)		Mpa(kgf/cm)	
Revestimento	10	CAUQ	35000	0,35
Base	30	BGS	2500	0,40
Subleito	Semi-infinita	Solo	1000	0,45

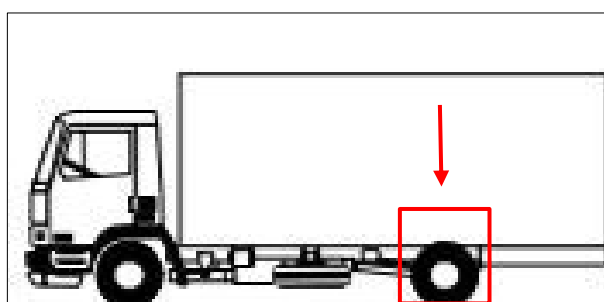
Fonte: Adaptado DER/SP (2006).

O programa considera um sistema de camadas elásticas com as seguintes suposições: cada camada é isotrópica, homogênea e elástica linear com módulo de resiliência e coeficiente de Poisson; revestimento e base são consideradas finitas em profundidade e infinitas na direção lateral; e o subleito é considerado infinito em profundidade e lateralmente.

Nesse trabalho avaliou-se os efeitos do tipo de pneumáticos e da sobrecarga. Os tipos de eixo utilizados foram o Eixo Simples (ES – 2 pneumáticos) com pneu extralargo 385/65 R22,5 e o Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD – 4 pneumáticos) com pneus 7,50 R15. Cabe ressaltar que o raio de carga será automaticamente calculado pelo software ELSYM5 já que o dado de entrada será a carga em tonelada força (tf) e a

pressão de inflação fornecido no manual da Associação Latino Americana de Pneus e Aros (ALAPA) em que indicação dada pelos fabricantes é de 115 psi (8,09 kgf/cm²) para o ES referente a uma carga de 4tf por pneu e é de 120 psi (8,44 kgf/cm²) para o ESRD referente a uma carga de 2tf por pneu (ALAPA, 2003). Cabe frisar que nas análises de tensões, deformações e deslocamentos as pressões citadas serão constantes para todo aumento de carga. Esse eixo simples (ES) com pneumático extralargo se compara com pneumático menor no eixo simples rodado duplo (ESRD) e a ideia de partida de análise foi em cima do eixo isolado traseiro de 10 tf no limite legal máximo (Figura 13).

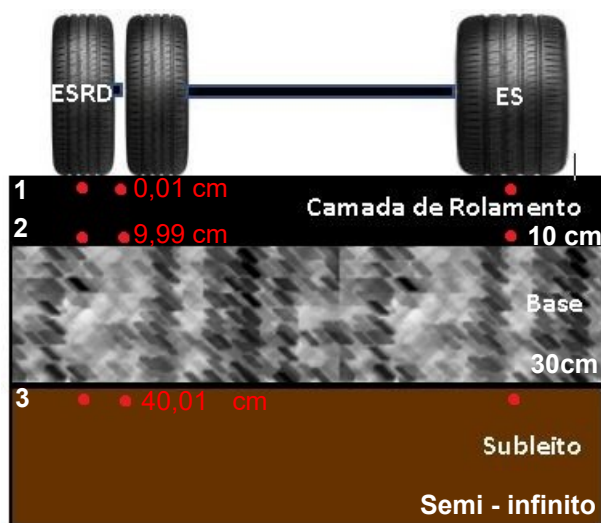
Figura 13 - Eixo isolado dianteiro 10tf.



Fonte: Adaptado DNIT (2006).

A Figura 14 mostra o eixo ESRD (com avaliação no centro do pneumático “0” e entre os pneumáticos “12.1 cm”), o eixo ES (com avaliação apenas no centro do pneumático “0”) e as posições analisadas quanto aos deslocamentos no ponto superior da camada de rolamento (0,01cm), tensões principais de tração no ponto inferior da camada de rolamento (9,99 cm) e as deformações principais no ponto superior da camada do subleito (40,01 cm). As cargas utilizadas para comparação foram: 8 tf (carga ideal fornecida pela ALAPA para ambos pneus utilizados e 2tf de sobrecarga a menos do que a carga máxima), 9tf (1tf de sobrecarga a menos do que a carga máxima), 10tf (carga máxima do limite legal), 11tf (carga máxima do limite legal mais 10% - tolerância do limite legal por eixo), 12tf (2tf de sobrecarga a mais do que a carga máxima).

Figura 14 - Representação dos pontos de análise, das camadas e das configurações dos pneumáticos.



Fonte: Autor (2018).

Por fim, a carga de partida é de 8tf para ambos tipos enquanto as informações dos pneumáticos são indicadas no manual da ALAPA que apresenta as informações de vários fabricantes de pneumáticos, assim como as pressões de inflação já citados e o afastamento entre pneus do ESRD (7,50 R15) de 242 mm. Há também de observar que o pneu 385/65 R22,5 (ES) possui a largura de rodagem de 385 mm enquanto o 7,50 R15 (ESRD) possui a largura de rodagem de 384mm (15 polegadas) para os dois pneus, ou seja, a análise dos resultados permitirá a observação dos efeitos das sobrecargas impostas ao pavimento por terem parâmetros (largura de rodagem, espessuras, características dos materiais e cargas) similares em relação aos diferentes tipos de pneumáticos.

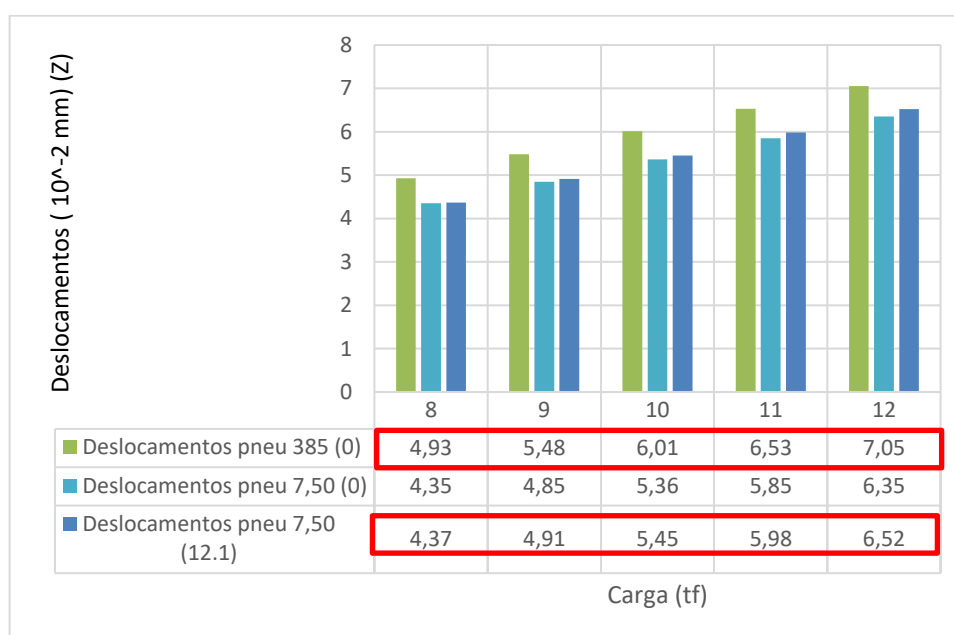
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o *software* ELSYM5 avaliou-se o deslocamento na superfície; a tensão de tração na fibra inferior da camada de revestimento e a deformação vertical de compressão no topo do subleito e os resultados emitidos pelos programa se encontram no Apêndice desse trabalho. Os dois primeiros esforços estão ligados ao efeito de fadiga do pavimento enquanto o último está ligado a deformação permanente. A partir disso,

a análise dos resultados se apresenta de maneira comparativa entre os tipos de eixos e pneus utilizados à medida que aumenta a carga.

A Figura 15 mostra o comportamento dos deslocamentos em gráfico e em tabela, no ponto 0,01 cm do revestimento do pavimento e na coordenada Z, que se apresenta numa crescente quanto à intensidade do deslocamento ocasionado a medida que cresce o carregamento de ambos os tipos de pneus utilizados, sobretudo com a dominância do pneu 385/65 R22,5 extralargo em vista do pneu rodado duplo 7,50 R15. Quanto ao duplo pneu 7,50 R15 observa-se um deslocamento maior entre os pneus (12,1 cm excêntrico do ponto de carregamento).

Figura 15 - Comparativo de deslocamentos ponto superior da regularização (0,01 cm) sujeita a fadiga.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 4 apresenta os deslocamentos e as taxas de deslocamentos referente ao pneumático extralargo 385 e ao pneumático 7,50 em que a carga limite máxima de 10 tf e seu deslocamento é a referência para analisar a taxa dos outros carregamentos e a taxa dos outros deslocamentos. Os maiores deslocamentos em ambos casos ocorrem na coordenada Z e entre os dois pneus o extralargo é mais prejudicial. Os deslocamentos estão relacionados ao efeito de fadiga e com essa análise conclui-se

que na posição de 0,01 cm da camada de revestimento, onde esse efeito é mais proeminente, o pneu extralargo 385 excede o pneu rodado duplo 7,50 em deslocamento 12,81% com 8tf até 8,13% com 12tf.

Tabela 4 – Taxa de deslocamento quanto aos tipos de pneus e comparativo de deslocamentos entre os tipos de pneus.

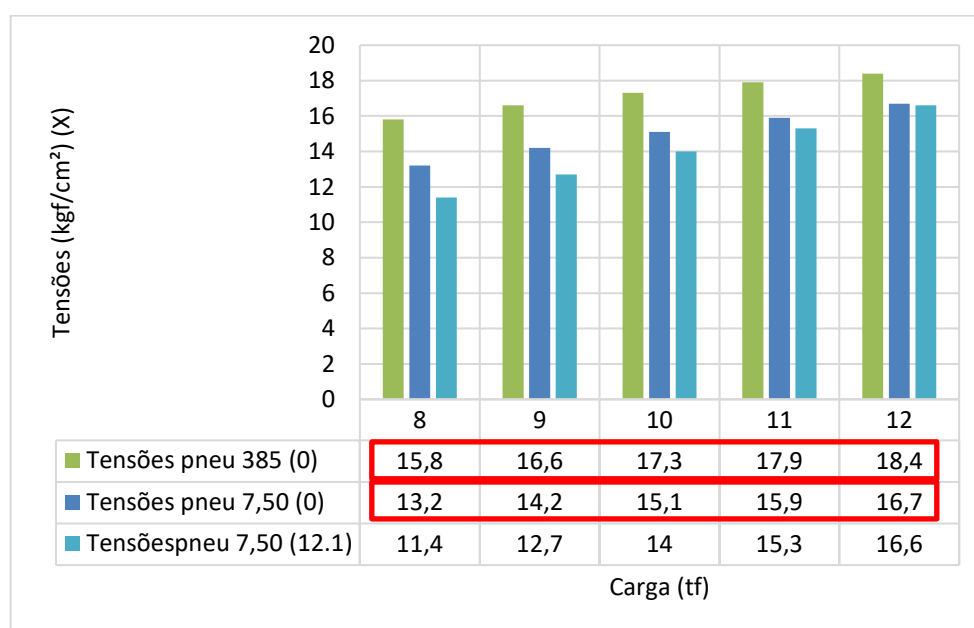
Pneu 385/65 R22,5 Extralargo			
Carga(tf)	Taxa de Carga	Deslocamento (10 ⁻² mm) (Z)	Taxa de deslocamento (%)
8	80%	4,93	82,03
9	90%	5,48	91,18
10	Referência (100%)	6,01	Referência (100%)
11	110%	6,53	108,65
12	120%	7,05	117,30
Pneu 7,50 R15 (Duplo)			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Deslocamento (10 ⁻² mm) (Z)	Taxa de deslocamento (%)
8	80%	4,37	80,18
9	90%	4,91	90,09
10	Referência (100%)	5,45	Referência (100%)
11	110%	5,98	109,72
12	120%	6,52	119,63
Comparativo de deslocamentos entre os tipos de pneus			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Relação (%) de deslocamento (pneu 385 extralargo / pneu 7,50)	
8	80%	112,81	
9	90%	111,61	
10	Referência (100%)	110,28	
11	110%	109,20	
12	120%	108,13	

Fonte: Autor (2018).

A Figura 16 mostra o comportamento das tensões de tração em gráfico e em tabela, no ponto 9,99 cm do revestimento do pavimento e na coordenada X, que se apresenta

numa crescente quanto à intensidade da tensão ocasionada a medida que cresce o carregamento de ambos os tipos de pneus utilizados, sobretudo com a dominância do pneu 385/65 R22,5 extralargo em vista do pneu rodado duplo 7,50 R15. Quanto ao pneu rodado duplo 7,50 R15 observa-se que a tensão é maior no centro do pneu.

Figura 16 - Comparativo de tensões de tração no ponto inferior da regularização (9,99 cm) sujeita a fadiga.



Fonte: Autor(2018).

A Tabela 5 apresenta as taxas de tensões de tração e as taxas de carregamento referente ao pneumático extralargo 385 e ao pneumático 7,50 em que a carga limite máxima de 10 tf e sua tensão de tração é a referência para analisar a taxa dos outros carregamentos e a taxa das outras tensões. As maiores tensões de tração em ambos casos ocorrem na coordenada X e entre os dois pneus, o extralargo é mais prejudicial. As tensões de tração estão relacionados ao efeito de fadiga do pavimento e com essa análise conclui que na posição de 9,99 cm da camada de revestimento onde esse efeito é mais proeminente, o pneu extralargo 385 excede o pneu rodado duplo 7,50 em tensão de tração na ordem de 19,70% para 8tf, até 10,18% para 12tf.

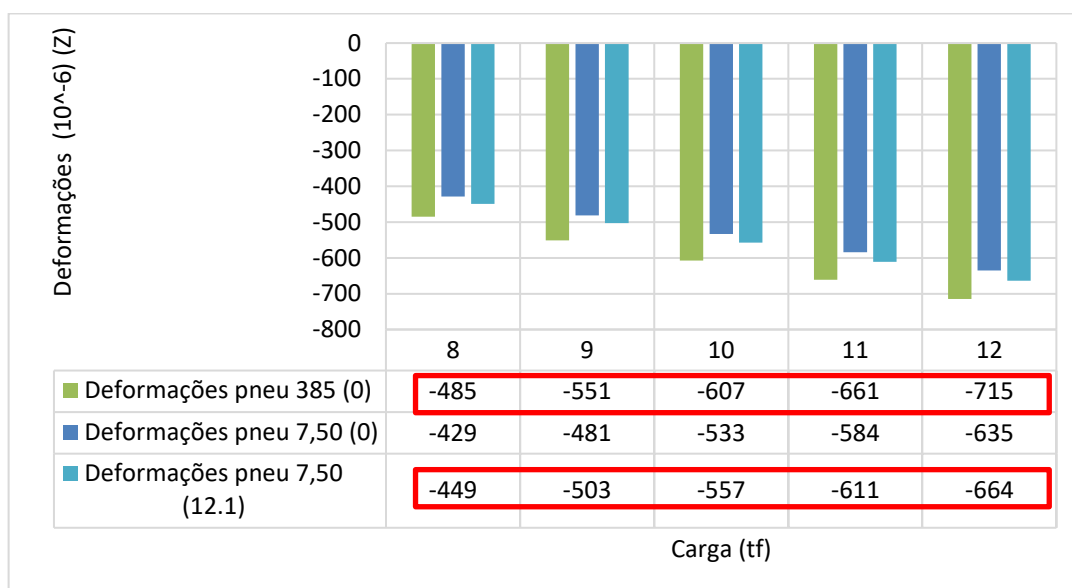
Tabela 5 - Taxa de tensões quanto aos tipos de pneus e comparativo de tensões entre os tipos de pneus.

Pneu 385/65 R22,5 Extralargo			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Tensão (kgf/cm ²) (X)	Taxa de tensão(%)
8	80%	15,8	91,33
9	90%	16,6	95,95
10	Referência (100%)	17,3	Referência (100%)
11	110%	17,9	103,47
12	120%	18,4	106,36
Pneu 7,50 R15 (Duplo)			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Tensão (kgf/cm ²) (X)	Taxa de tensão (%)
8	80%	13,2	87,42
9	90%	14,2	94,04
10	Referência (100%)	15,1	Referência (100%)
11	110%	15,9	105,30
12	120%	16,7	110,60
Comparativo de tensões entre os tipos de pneus			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Taxa (%) de tensão (pneu 385 extralargo / pneu 7,50)	
8	80%	119,70	
9	90%	116,90	
10	Referência (100%)	114,57	
11	110%	112,58	
12	120%	110,18	

Fonte: Autor (2018).

A Figura 17 mostra o comportamento das deformações de compressão em gráfico e em tabela, no ponto 40,01 cm que localiza na parte superior do subleito, que se apresenta numa crescente quanto à intensidade da deformação de compressão ocasionado a medida que cresce o carregamento de ambos os tipos de pneus utilizados, sobretudo com a dominância do pneu 385/65 R22,5 extralargo em vista do pneu rodado duplo 7,50 R15 . Quanto ao pneu 7,50 R15 observa-se um deslocamento maior entre os pneus (12,1 cm excêntrico do ponto de carregamento).

Figura 17 - Comparativo de deformações de compressão no ponto superior do subleito (40,01 cm) sujeita a deformação permanente.



Fonte: Autor (2018).

A Tabela 6 apresenta as taxas de deformações e as taxas de carregamento referente ao pneumático extralargo 385 e ao pneumático 7,50 em que a carga limite máxima de 10 tf e sua deformação é a referência para analisar a taxa dos outros carregamentos e a taxa das outras deformações. As maiores deformações de compressão em ambos casos ocorrem na coordenada Z e entre os dois pneus o extralargo é mais prejudicial. As deformações de compressão estão relacionadas ao efeito de deformação permanente do pavimento e com essa análise conclui que na posição de 40,01 cm da camada do subleito, o pneu extralargo 385 excede o duplo pneu 7,50 em deformação de compressão na ordem de 8,02% para 8tf até 7,68% para 12tf.

Tabela 6 - Taxa de deformações quanto aos tipos de pneus e comparativo de deformações entre os tipos de pneus.

Pneu 385/65 R22,5 extralargo			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Deformações (10^{-6}) (Z)	Taxa de deformação (%)
8	80%	-485	79,90
9	90%	-551	90,77
10	Referência (100%)	-607	Referência (100%)
11	110%	-661	108,90
12	120%	-715	117,79
Pneu 7,50 R15			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Deformações (10^{-6}) (Z)	Taxa de deformação (%)
8	80%	-449	80,61
9	90%	-503	90,31
10	Referência (100%)	-557	Referência (100%)
11	110%	-611	109,69
12	120%	-664	119,21
Comparativo de deformações entre os tipos de pneus			
Carga(tf)	Taxa de Carga (%)	Taxa (%) de deformação (pneu 385 extralargo / pneu 7,50)	
8	80%	108,02	
9	90%	109,54	
10	Referência (100%)	108,98	
11	110%	108,18	
12	120%	107,68	

Fonte: Autor (2018).

Quanto as análises realizadas, o pneu 385/65 R22,5 extralargo (ES) é mais nocivo que o pneu rodado duplo 7,50 R15 para uma estrutura de pavimento em termos de fadiga e deformação permanente, pois o pneu extralargo transmite mais esforços para o pavimento do que o pneu rodado duplo e uma justificativa para isso é que o primeiro possui apenas um ponto de descarregamento enquanto o segundo possui dois, logo a resistência natural da estrutura resiste mais no segundo caso por uma questão de

concentração de carga a partir do descarregamento. Por outro lado, é interessante observar que ao aumentar o carregamento a taxa dos esforços (deslocamento, tensão de tração e deformação de compressão) entre o pneu extralargo 385 e o pneu rodado duplo 7,50 decresce devido a perda de eficiência de transmitir esforços deste pneu, pois a cada aumento de carregamento no pneu rodado duplo 7,50 a taxa de qualquer esforço se assemelha muito a taxa de carregamento enquanto no pneu extralargo 385 a taxa de qualquer esforço vai ligeiramente diminuindo em relação a taxa de carregamento e uma justificativa para isso é que ao aumentar o carregamento a área de propagação de esforços dos pneus do rodado duplo vão sobrepondo até o ponto que os esforços entre os pneus superam os esforços analisados ao centro de um pneu do rodado duplo e até mesmo do pneu extralargo em carregamentos superiores aos que foram empregados nesse trabalho conforme as tendências nos gráficos nos mostra.

Outra análise pertinente é a de quantificar o aumento do esforço entre o carregamento do limite legal de 10tf e a tolerância de 10% por eixo que nesse caso leva o carregamento para 11tf. Quanto ao deslocamento na camada de revestimento, no ponto 0,01 cm, é de um acréscimo de 8,65% para o pneu extralargo e 9,72% do pneu rodado duplo, quanto a tensão de tração no ponto 9,99 cm é de 3,47% para o primeiro e 5,30% para o segundo e quanto a deslocamento de compressão no ponto de 40,01 cm é de 8,90% para o primeiro e 9,69% para o segundo. Esses acréscimos nas taxas dos esforços apesar de estarem abaixo da taxa de carregamento de 10% estão próximos os valores e aumentos dessa ordem auxiliam no comprometimento mais rápido do pavimento e suas camadas, já que a grandeza dos carregamentos estão variando tanto para baixo quanto para cima do limite máximo de carga.

5. CONCLUSÃO

O pavimento tem como prerrogativa apresentar maior durabilidade de tempo quando concebido seu projeto, contudo há inúmeras variáveis que estão relacionadas ao seu desempenho e assim a interação entre carga, pneu e pavimento configura um dos principais fatores que influencia na sua vida útil. Observa-se que o aumento de carregamento está bastante vinculado com os aumentos dos esforços que os pavimentos têm que suportar, contudo os elementos de transição de esforços como

tipo de pneumático não são levados em conta nos métodos de dimensionamento de pavimento e isso pode fazer uma sensível diferença.

Os resultados das simulações dos principais deslocamentos, tensões de tração e deformações de compressão quanto ao tipo de pneumático utilizado mostra uma relevante diferença entre o pneu extralargo 385/65 R22,5 com largura de 385 mm eixo simples (ES) e o pneu 7,50 R15 com eixo simples rodado duplo (ESRD) somando 384 mm de largura. A partir das análises de resultados, levando em consideração carregamento tanto abaixo como acima da carga máxima de 10tf do eixo simples traseiro, o pneu extralargo 385/65 R22,5 é mais danoso à estrutura do pavimento pelo fato de transferir mais esforço do que o pneu rodado duplo 7,50 R15 em todos carregamentos estudados nesse trabalho.

Os objetivos desse trabalho foram alcançados, pois a comparação feita entre os tipos de pneumáticos sobre os mesmo carregamentos mostrou a melhor opção de transmissão do carregamento para o pavimento que no caso foi o pneu 7,50 R15 com eixo simples rodado duplo (ESRD) dentro das cargas legais, carga com a tolerância de 10% de excesso por eixo e carga com 2tf a mais que o limite máximo por eixo. Assim, essa opção em questão é menos danoso frente aos defeitos recorrentes, fadiga e deformação permanente, na pavimentação asfáltica.

Como esse tema é bastante vasto pela pluralidade de pneumáticos existentes e pelos diversos tipos de eixos é de grande importância haver continuidade dos estudos nessa área que também envolve pavimentação da qual é de extrema relevância para o progresso de qualquer país. Como isso são propostos estudos para trabalhos futuros:

- Analisar esforços de extralargos em pavimentos semi-rígidos e rígidos;
- Desenvolver um modelo teórico que expressa a transmissão de esforços em vista do pneumático e do eixo utilizado;
- Dimensionar um pavimento flexível com variações de estruturas levando em contas os esforços obtidos entre esses dois tipos de pneumáticos 385/65 R22,5 extralargo (ES) e 7,50 R15 (ESRD);
- Fazer uma comparação entre esses pneumáticos levando em consideração área de contato do pneumático com o pavimento e pressão de inflação alterando à medida que aumenta a carga.

REFERÊNCIAS

ALAPA. **Associação Latino Americana de Pneus e Aros**. São Paulo, 2003.

_____. **Manual de normas técnicas**. São Paulo, 299 p., 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAVARESCO, D. **dimensionamento de pavimentos flexíveis novos e existentes por diferentes métodos**. Relatório iniciação científica PIBIC/CNPq-Fundação Araucária-UEM. Maringá, 2010.

BERNUCCI, L.B., MOTTA LMG, CERATTI JAP, SOARES JB. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BONAQUIST, R.; SURDAHL, R. ; MOGAWER W. **Effect oftire pressure on flexible pavement: response and performance**. Transportarion Research Record, Washington, n.l227, 1989.

BRASIL. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Estudos de Tráfego. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Manual de pavimentação**. 3. Ed. – Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Decreto n. 50.903, de 03 de jul. de 1961. **Dispõe sobre o peso máximo permissível dos veículos para tráfego nas vias públicas**. Brasília,DF, julho 1961.

BRASIL. Decreto n. 62.127, de 16 de Janeiro de 1968. **Aprova o Regulamento do Código Nacional de Trânsito**. Brasília,DF, Janeiro, 1968.

BRASIL. Decreto n. 8.933, de 7 de Fevereiro de 1990. **Altera dispositivos do Regulamento do Código Nacional de Trânsito, e dá outras providências**. Brasília,DF, Fevereiro, 1990.

BRASIL. Lei n. 7.408, de 25 de Novembro de 1985. **Permite a tolerância de 5% (cinco por cento) na pesagem de carga em veículos de transporte**. Brasília,DF, Novembro, 1985.

BRASIL. Lei n. 13.103, de 02 de Março de 1985. **Motorista profissional**. Brasília,DF, Março 2015.

BRITO, L. A. T. & GRAEFF A. G. **Métodos De Dimensionamento De Pavimentos**. Metodologias e seus impactos nos projetos de pavimentos novos e restaurações relatório final preparado por Prime Engenharia e Consultoria LTDA. Porto Alegre , 2009.

Conselho nacional de Trânsito – CONTRAN. **Resolução CONTRAN nº 12**, de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Fevereiro, 1998.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico - Empírico aplicada a um Trecho**. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DER. **Departamento de estradas de rodagem**. Secretaria dos transportes. Diretoria de Engenharia. Instrução de projeto. São Paulo, 2006.

_____. **Projeto de pavimentação**. São Paulo, 53p., 2006.

FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SÓRIA. M. H. A.: WTDMER, J. A. **Estudo comparativo dos efeitos do tipo de rodagem e do tipo de suspensão sobre o desempenho dos pavimentos**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. 28., 1994, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: ABPv, 1994.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SisPav**. Tese de Doutorado . Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Conselho nacional de Trânsito – CONTRAN. **Resolução CONTRAN nº 12**, de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres.

GUNZI, A. **Pavimentos de Concreto e Estruturas de Dados**. Disponível em: <<https://ideiasesquecidas.com>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis**; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOTTA, L.M.G. **Noções de Mecânica dos Pavimentos**. Laboratório de Geotecnia - Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese de Doutorado. São Paulo, 2010.

NETO, R. S. B. **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados Através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de uma catálogo simplificado de pavimentos para a região de campo grande (MS)**. Dissertação de Mestrado Engenharia de Transportes. USP, São Sarlos, 2004.

PERDOMO. D: NOKES 8 . **Theoretical analysis of the effects of wide-base tires on flexible pavements using CIRCL Y**. Transponation Research Record, Washington. n. 1388, 1993.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

PNEUSMART. **Informações do pneumático**. Disponível em: <https://www.pneusmart.it/size-help-popup>. Acesso em: 18jun. 2018.

SANTOS, M. J. L. **Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis**. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Resultados dos deslocamentos do pneu extralargo 385/65 R22,5 eixo simples (ES).	52
Apêndice 2 - Resultados dos deslocamentos do pneu 7.50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD).	53
Apêndice 3 - Resultados das tensões principais do pneu extralargo 385/65 R22,5 eixo simples (ES).	54
Apêndice 4 - Resultados das tensões principais do pneu 7.50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD).	55
Apêndice 5 - Resultados das deformações principais do pneu extralargo 385/65 R22,5 eixo simples (ES).	56
Apêndice 6 - Resultados deformações tensões principais do pneu 7.50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD).	57

Apêndice 1 - Resultados dos deslocamentos do pneu extralargo 385/65 R22,5 eixo simples (ES).

Carga (tf) (Posição)	Deslocamento (10^{-2} mm) (ES)		
	UX	UY	UZ
8(0)	0	0	4,93
9(0)	0	0	5,48
10(0)	0	0	6,01
11(0)	0	0	6,53
12(0)	0	0	7,05

Apêndice 2 - Resultados dos deslocamentos do pneu 7,50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD).

Carga (tf) (Posição)	Deslocamento (10^{-2} mm) (ESRD)		
	UX	UY	UZ
8(0)	0,175	0	4,35
8(12.1)	0	0	4,37
9(0)	0,196	0	4,85
9(12.1)	0	0	4,91
10(0)	0,217	0	5,36
10(12.1)	0	0	5,45
11(0)	0,237	0	5,85
11(12.1)	0	0	5,98
12(0)	0,258	0	6,35
12(12.1)	0	0	6,52

Apêndice 3 - Resultados das tensões principais do pneu extralargo 385/65 R22,5 eixo simples (ES).

Carga (tf) (Posição)	Tensão Principal (kgf/cm ²) (ES)		
	PS1(X)	PS2(Y)	PS3(Z)
8(0)	15,8	15,8	-2,74
9(0)	16,6	16,6	-2,95
10(0)	17,3	17,3	-3,14
11(0)	17,9	17,9	-3,31
12(0)	18,4	18,4	-3,48

Apêndice 4 - Resultados das tensões principais do pneu 7,50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD).

Carga (tf) (Posição)	Tensão Principal (kgf/cm ²) (ESRD)		
	PS1(X)	PS2(Y)	PS3(Z)
8(0)	13,2	10,5	-2,06
8(12.1)	11,4	5,0	-1,81
9(0)	14,2	11,2	-2,25
9(12.1)	12,7	5,96	-2,05
10(0)	15,1	11,8	-2,43
10(12.1)	14	6,96	-2,28
11(0)	15,9	12,3	-2,61
11(12.1)	15,3	8,01	-2,5
12(0)	16,7	12,9	4,0
12(12.1)	16,6	9,09	-2,73

Apêndice 5 - Resultados das deformações principais do pneu extralargo 385/65 R22,5 eixo simples (ES).

Carga (tf) (Posição)	Deformação Principal (10^{-6}) (ES)		
	PE1(X)	PE2(Y)	PE3(Z)
8(0)	219	219	-485
9(0)	244	244	-551
10(0)	268	268	-607
11(0)	292	292	-661
12(0)	316	316	-715

Apêndice 6 - Resultados deformações principais do pneu 7,50 R15 eixo simples rodado duplo (ESRD).

Carga (tf) (Posição)	Deformação Principal (10^{-6}) (ESRD)		
	PE1(X)	PE2(Y)	PE3(Z)
8(0)	201	176	-429
8(12.1)	213	183	-449
9(0)	226	198	-481
9(12.1)	238	205	-503
10(0)	250	219	-533
10(12.1)	263	227	-557
11(0)	274	240	-584
11(12.1)	289	249	-611
12(0)	298	261	-635
12(12.1)	313	271	-664