

Apresentação Plenário

Ruído de tráfico: Revisão de acoplamento pneus/estrada

Samir N. Y. Gerges,
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Campus Universitário – Trindade – Florianópolis – SC
Tel.: 55-48-99807484 – Fax: 55-48-32320826
E-mail contato: samir.acustica@gmail.com

Resumo

Ruído exterior do pneu/estrada é um dos principais problemas ambientais, especialmente considerando o crescimento exponencial do tráfego. Os problemas vibroacústicos do sistema de transporte são complexos devido à participação de múltiplas fontes de ruído e vibração em uma faixa de frequência larga. Estas fontes são o acoplamento entre os pneus/estrada, motor, caixa de velocidades, sistema de transmissão, componentes (refrigeração, unidade. etc.). O ruído pneu/estrada geralmente domina as altas velocidades; depende do tipo de padrões dos dentes de pneus e da textura de superfície da estrada (porosidade, tamanho de grão, a rigidez, a compactação, etc.) e ruído da unidade de powertrain domina a baixas velocidades. A trajetória de propagação pode ser através de ruído carregado pelo ar para fora, de ruído carregado por estrutura para fora e também para os passageiros no interior do veículo. São apresentadas as técnicas de medições de absorção sonora, e também são mostrados alguns resultados medidos. Os mecanismos de ruído pneu/pavimento gerados são analisados mostrando as fontes de bombeamento, aerodinâmicas e outras. Os diferentes métodos de medições de ruído pneu/estrada são apresentados tanto em laboratório quanto no campo. Técnicas experimentais do acoplamento de ruído pneu/estrada são revistos. A solução de baixo nível de ruído é discutida tanto no pneu quanto nas estradas.

Abstract

Exterior tire/road noise is one of the major environmental problems associated with ambient conditions, especially considering the exponential growth in traffic. The vibroacoustic problems associated with transport systems are complex due to the participation of multiple sources of noise and vibration in a wide frequency band. These sources include the tire/road coupling, engine, gearbox, transmission system, and other components (refrigeration and drive power systems). Tire/road noise generally dominates at high speeds; dependent on the type of tire tread pattern and the road texture surface (porosity, grain size, rigidity, compaction, etc.) and power unit noise at low speeds. The propagation trajectory can be via air (outside the vehicle) and as structure-born noise to the outside and also to the passengers inside the vehicle. In this presentation the

measurement techniques for sound absorption is presented and some measurement results are shown. Also, the mechanisms associated with the generation of tire/road noise are reviewed through a description of pumping, aerodynamic and other sources. Different methods for measuring tire/road noise both in the laboratory and in the field are presented. Experimental techniques related to tire/road noise coupling are reviewed. Low noise solutions aimed at both the tire and the road surface are discussed.

1. Introdução

Cada vez mais a indústria automobilística direciona esforços com o objetivo de produzir veículos de qualidade. Neste contexto, os níveis de ruído gerados durante o funcionamento do veículo desempenham um papel fundamental, como indicador de qualidade do produto. Na maioria das vezes, o consumidor relaciona o ruído com um problema do automóvel e reclama ao concessionário, o que acaba ocasionando elevação dos custos de garantia e problemas de imagem para o fabricante.

O termo “pneus/rolagem” denota o ruído emitido pelo pneu durante o rolamento, sendo o resultado da interação entre o pneu e a superfície de rolagem. Trabalhos técnicos relacionados a este tema são bastante raros antes dos anos 70, embora programas de pesquisas tenham sido iniciados nos EUA e Inglaterra durante esta década. Somente no final da década de 70, no entanto, é que os fabricantes voltaram sua atenção para este problema, que passou a ser assunto de várias atividades de pesquisa e desenvolvimento, bem como tema de grande interesse em congressos e conferências.

De acordo com a política de ruído da Comunidade Européia, 20% da população da União Européia está exposta à níveis de ruído de tráfego inaceitáveis, maiores do que 65 dBA e outras 45% estão expostas à níveis incômodos, maiores do que 55 dBA. Um relatório do Institute of Noise Control Engineering (INCE) recomendou que “Emissões de ruído de pneus durante condições normais de utilização do veículo precisam ser substancialmente reduzidas. Enquanto isso não for feito, as regulamentações para ruído veicular serão inefetivas”.

De modo a reduzir os níveis de ruído dos veículos, tanto interna quanto externamente, é necessário estabelecer medidas de controle para as fontes que compõem o ruído global. Mesmo sob condições de aceleração, o ruído de rolagem representa a maior contribuição para o ruído total emitido pelo veículo, após o ruído do motor, como mostrado na Figura 1.

O ruído gerado por um veículo é composto principalmente por parcelas provenientes dos pneus/rolagem e do trem de força (motor, transmissão e acessórios), conforme visto na Figura 1, sendo que ambas as parcelas possuem uma forte relação com a velocidade do veículo. De forma geral, pode-se dizer que, para baixas velocidades, o nível total gerado pelo veículo é dominado pelo trem de força, ao passo que, para altas velocidades, a maior contribuição provém dos pneus/rolagem. Pode-se, assim, definir uma velocidade de cruzamento na qual os efeitos das duas fontes são semelhantes. Assume-se que esta velocidade encontra-se na faixa de 40-50 km/h para veículos leves e 60-70 km/h para caminhões, embora estas faixas tendam a cair devido ao maior desenvolvimento vibroacústico do trem de força.

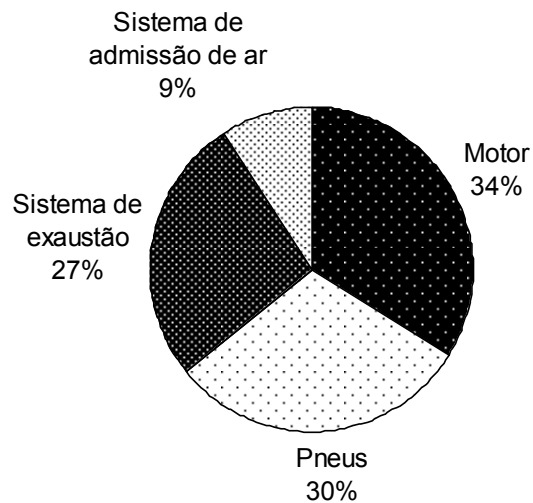


Figura 1: Contribuição das fontes de ruído no automóvel.

A Figura 2 mostra um exemplo típico de níveis de ruído para um carro moderno, em várias velocidades. Nota-se que o ruído dos pneus/rolagem é dominante sobre o ruído do trem de força para todas as velocidades e marchas, exceto para a primeira marcha.

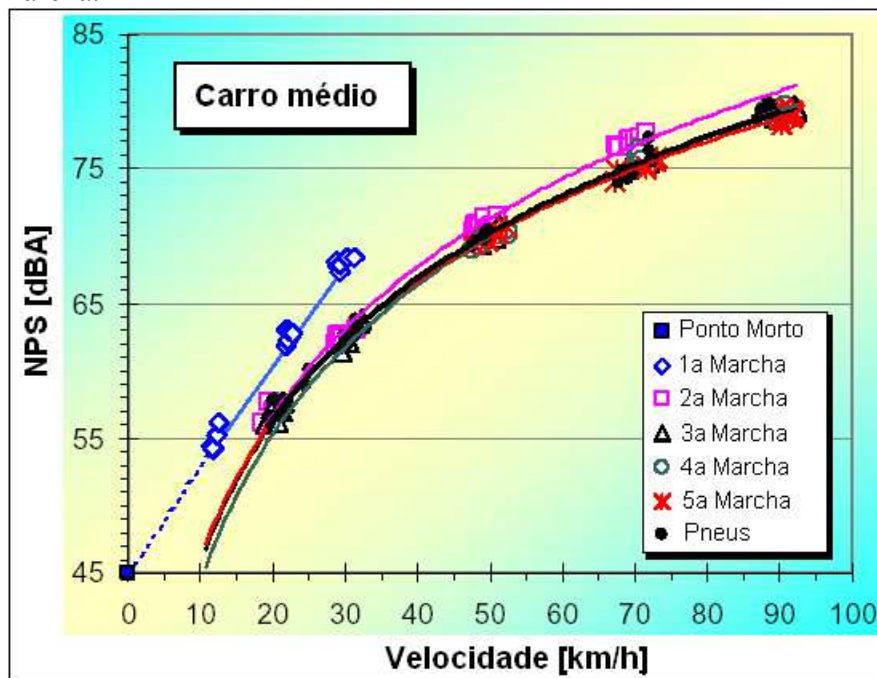


Figura 2: Ruído total de um carro médio. [1]

Os valores de Nível de Pressão Sonora (NPS) mostrados na Figura 2 representam a soma dos níveis gerados pelo trem de força e pneus/rolagem. Os níveis gerados somente pelos pneus/rolagem são identificados pelo símbolo (•). Com exceção da primeira marcha, todas as demais condições apresentam um nível de ruído muito

semelhante àquele gerado somente pelos pneus/rolagem. Percebe-se que acima de 50 km/h o NPS começa a ficar superior a 70 dBA e assim domina o ruído total.

2. Características vibroacústicas de pneus/estrada

A geração de ruído devido aos pneus/rolagem é composto por 2 mecanismos: os de geração de energia acústica e os de amplificação. Os mecanismos de geração são devidos basicamente à excitação da carcaça do pneu. A carcaça pode ser excitada através dos impactos do pneu na superfície (pavimento), excitações tangenciais do pneu devido à fricção (stick-slip) e bombeamento de ar próximo à banda de rodagem. A Figura 3 mostra um esquema dos mecanismos de geração de energia.

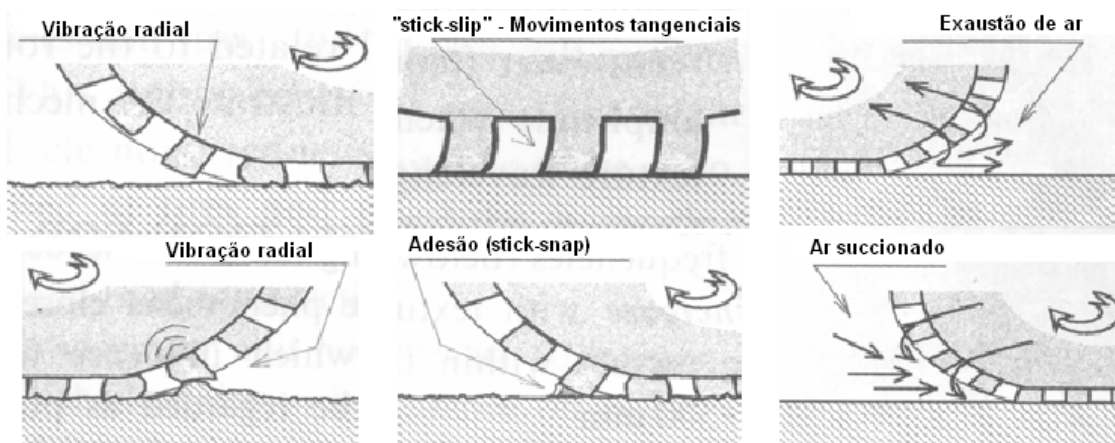


Figura 3: Mecanismos de geração de energia vibratória em pneus[1].

Estas vibrações são, então, amplificadas e irradiadas para o meio externo em forma de ruído, através da ação de vários outros mecanismos, mostrados na Figura 4. A vibração da carcaça excita os modos da cavidade acústica interna do pneu, o que provoca um acoplamento modal e, conseqüentemente, elevada irradiação de ruído.

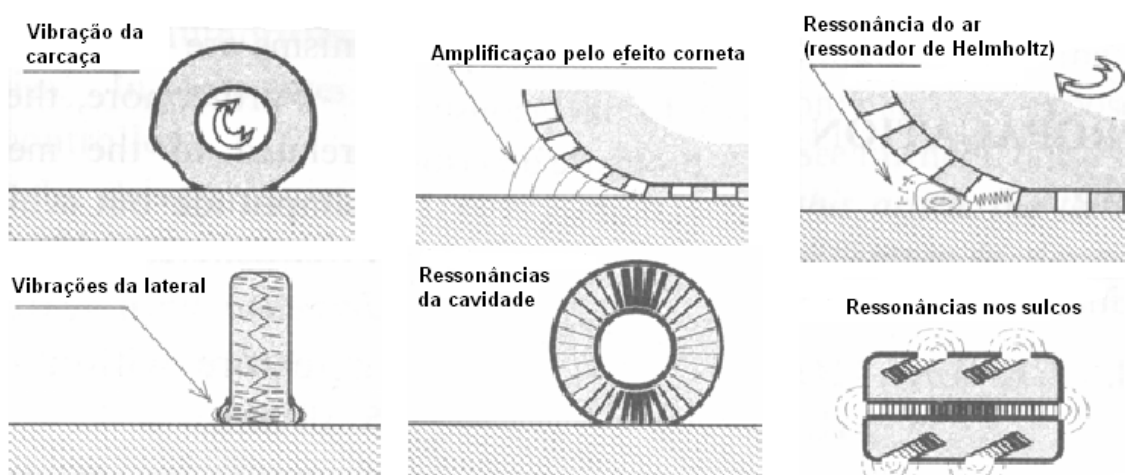


Figura 4: Mecanismos de amplificação de vibração em pneus [1].

Os efeitos da rugosidade do pavimento, efeitos da força de excitação devido às características superficiais da banda de rodagem, efeitos do torque nos pneus durante o período de aceleração, etc são consideradas as forças de excitação para a geração do

ruído de rolagem. Geralmente, quando são considerados problemas de ruído em estruturas mecânicas, a redução da amplitude de vibração de componentes com grande área, bem como a redução da força de excitação são efetivas para a diminuição dos níveis de pressão sonora gerados. No caso de pneus, a radiação sonora da banda de rodagem é significativa, devido à larga área de contato entre a banda e a superfície (pavimento).

Vários parâmetros podem afetar o comportamento vibroacústico dos pneus. Talvez o fator mais importante que influencie o comportamento do ruído dos pneus/rolagem seja a velocidade. A relação entre o NPS gerado e a velocidade é dada por:

$$NPS = A + B \cdot \log(V)$$

onde A e B são constantes de velocidade. Plotando-se as constantes A e B em um diagrama x-y, nota-se que, para cada combinação de pneu ou pavimento, tem-se um comportamento basicamente linear, como mostrado na Figura 4.

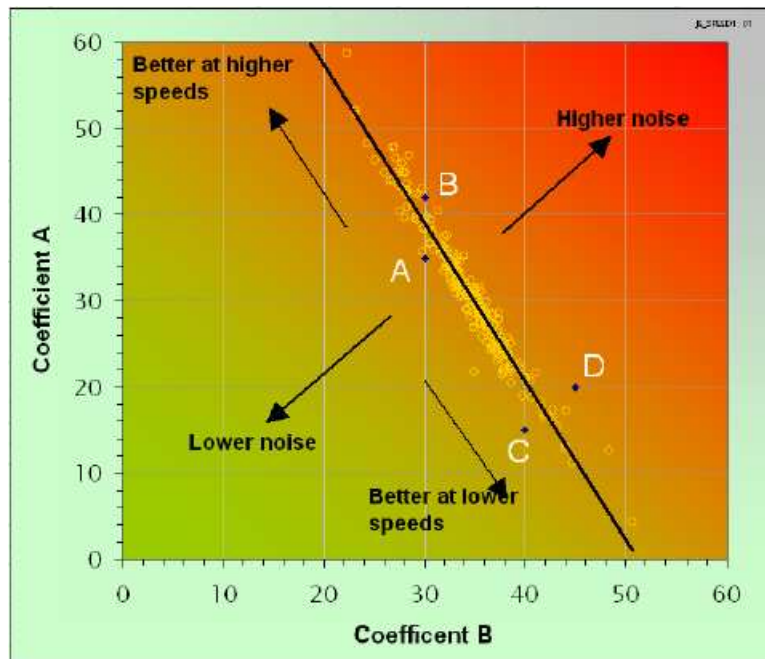


Figura 4: Relação entre os coeficientes de velocidade A e B. [1]

Os pontos A, B, C e D na Figura 4 representam uma combinação de pneu/pavimento. Esta figura é útil na seleção de pneus ou pavimentos, pois relaciona os níveis de ruído de acordo com a velocidade.

Outro parâmetro com grande influência sobre o ruído dos pneus/rolagem é o tipo de pavimento. Diferentes tipos de superfícies podem fornecer grandes variações no nível de pressão sonora gerado. De um modo geral, quanto mais grossa a textura da superfície, maiores serão os níveis de emissão de ruído. A Figura 5 mostra uma comparação de ruído em função de vários tipos de superfícies. Diferenças de até 17 dBA podem ser verificadas entre a mais silenciosa e a mais ruidosa. Os níveis de ruído são expressos em CPKI (Close Proximity Index), medidos de acordo com a norma ISO/DIS 11819-2. As superfícies são classificadas de acordo com o MPD (Mean Profile Depth).

Vários estudos relacionados a ruído de pneus/rolagem mostram que pequenas diferenças são verificadas entre tipos diferentes de pneus. Um dos mais recentes estudos sobre a diferença de ruído entre pneus é mostrado na Figura 6. Os resultados mostram uma faixa de 10 dBA entre o melhor e o pior pneu, para 20 tipos diferentes testados (tamanhos similares, com mesma condição de desgaste e mesmo tipo de piso). Outros estudos, todavia, mostraram diferenças ainda menores entre os modelos. Estas comparações devem, entretanto, sempre serem feitas para condições similares de pneus e pavimento. Quando efeitos de desgaste, largura do pneu e demais outros parâmetros são envolvidos na análise, as diferenças verificadas entre os tipos de pneus podem aproximar-se das diferenças verificadas para os diferentes tipos de pavimentos.

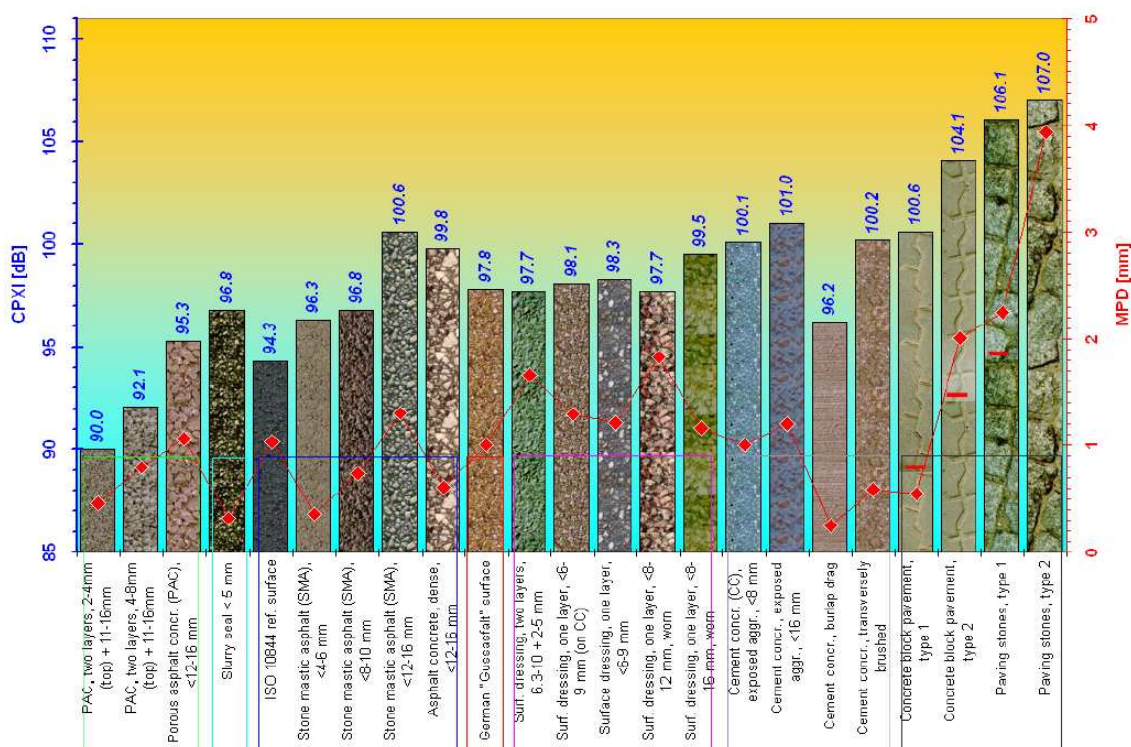


Figura 5: Níveis de ruído do pneu/rolamento para várias superfícies (pavimentos), a 80 km/h. [1]

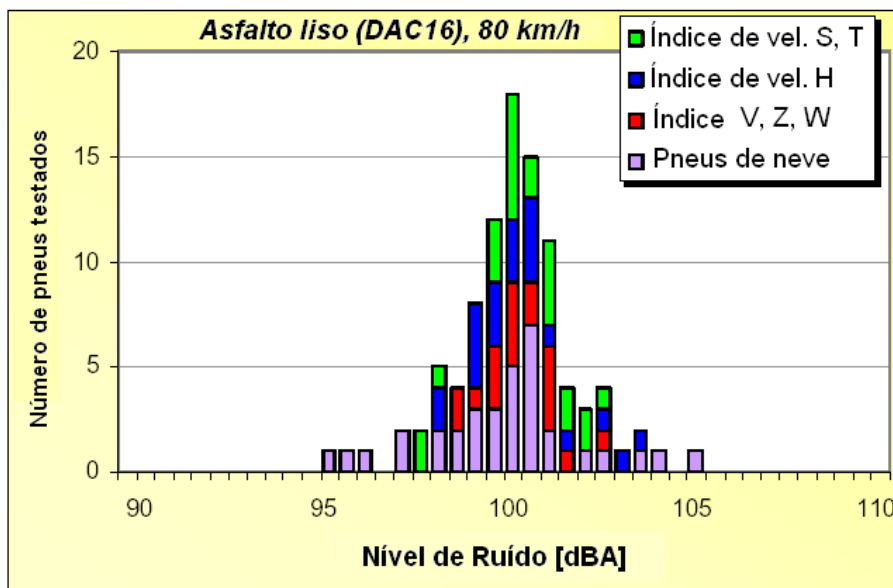


Figura 6: Distribuição dos níveis de ruído em função do tipo do pneu. [1]

Em pneus comerciais disponíveis para carros de passageiros, o desenho da banda de rodagem possui um arranjo desigual de sulcos na direção circunferencial, como mostrado na Figura 7.

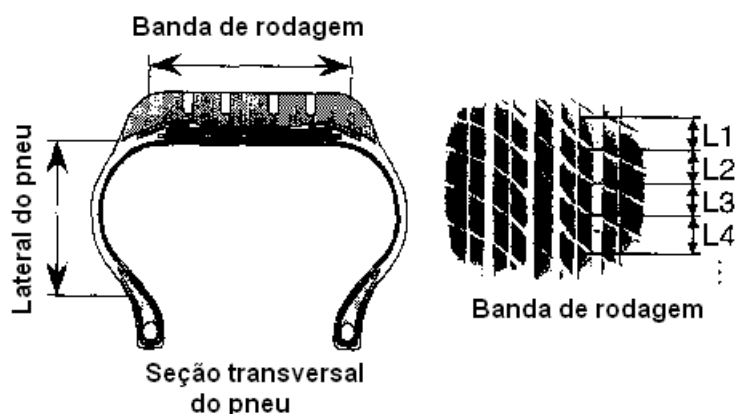


Figura 7: Espaçamento variável na banda de rodagem.

Este espaçamento variável tem como objetivo evitar a geração de ruídos tonais, causados por espaçamentos iguais entre sulcos vizinhos. Com o espaçamento variável, tem-se uma distribuição do ruído ao longo do espectro de frequências. As diferenças entre os desenhos das bandas de rodagem diferenciam os pneus também em termos de ruído, pois afeta a distribuição do ruído no espectro de frequência.

O ruído de rolagem também é afetado por parâmetros como carregamento vertical e pressão. A Figura 8 mostra o efeito da variação do carregamento vertical (peso do veículo). O nível de pressão sonora, para o pneu testado, aumenta com o aumento da carga vertical até 3000N. A partir desta carga, uma diminuição é verificada. Esta variação de comportamento é devido à variação de rigidez do pneu causada pela carga, o que acarreta em alterações nas frequências da carcaça e, conseqüentemente, em acoplamentos com a cavidade.

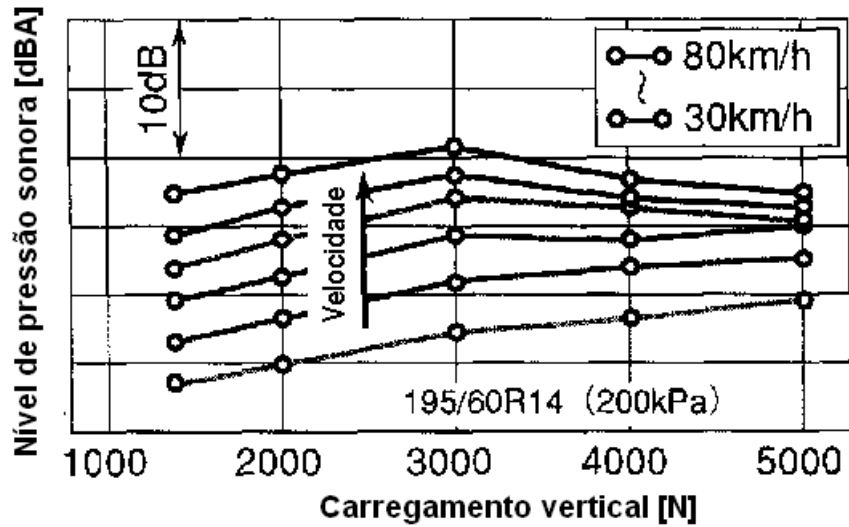


Figura 8: Mudanças no ruído do pneu devido à carga vertical. [8]

O efeito da pressão de enchimento pode ser visto na Figura 9. Estes efeitos são em função do torque aplicado, ou seja, variam de acordo com as condições de aceleração. Para uma condição sem torque, o nível de pressão sonora atinge um valor mínimo para a pressão normal de trabalho. Entretanto, à medida que o torque aumenta, o NPS aumenta com o aumento da pressão.

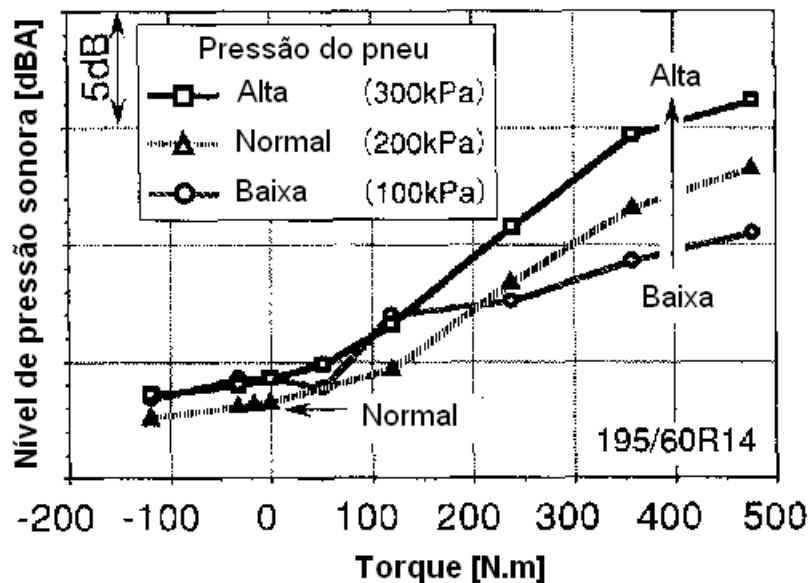


Figura 9: Mudanças no ruído do pneu devido ao torque e pressão de enchimento. [8]

3. Métodos de avaliação de ruído de pneus

Durante as últimas décadas, o ruído dos pneus/rolagem tem sido reconhecido com um das mais significantes parcelas do ruído de tráfego. É, portanto, necessário desenvolver medidas de controle de ruído aplicáveis, que não impliquem em problemas de segurança. Estas medidas devem ser embasadas em métodos apropriados de avaliação experimental, sendo que, neste contexto, várias atividades de regulamentação para estes

tipos de testes foram iniciadas. Métodos de medição normatizados são necessários não somente para avaliação e classificação dos pneus, mas também de pavimentos.

Durante muitos anos têm sido desenvolvidos métodos normatizados para avaliações de ruído em veículos automotores. Estes métodos permitem a avaliação de diferentes tipos de ruído, mas não em particular para os ruídos dos pneus/rolagem, uma vez que os experimentos são feitos em condições que enfatizam a geração do ruído pelo trem de força do veículo.

Alguns anos atrás foram propostas imposições regulamentadoras para as emissões de ruído dos pneus, principalmente pela União Européia o que forçou a sugestão de métodos de medição e classificação apropriados. Basicamente, quatro métodos estão disponíveis para avaliação do ruído gerado pelos pneus/rolagem:

- Método Coast-by;
- Método Trailer;
- Método de Tambor em Laboratório;
- Método Coast-by usando Trailer.

Método Coast-by – Neste método, um veículo de teste equipado com os pneus a serem testados rola com o motor desligado por uma pista de testes, onde estão localizados microfones para captação do ruído. Os microfones são localizados a 7,5 m do centro da pista de teste por onde o veículo trafega, como mostra a Figura 10. O nível máximo de ruído, ponderado em escala A, é gravado quando o veículo passa, em rolamento, pela posição do microfone. É comum também a gravação de um espectro em bandas de 1/3 de oitava no momento de verificação do nível máximo de ruído. Este método é usualmente utilizado para classificação da influência do tipo de pneu e pavimento.

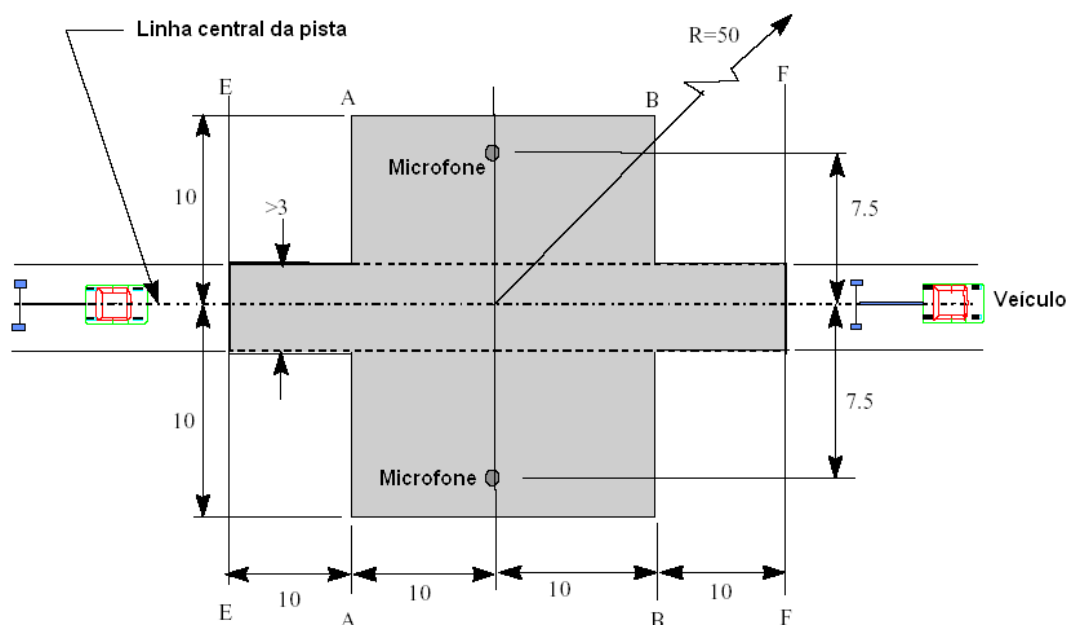


Figura 10: Esquema de medição do método “coast-by”.

Este método é um dos mais representativos para a avaliação da contribuição dos ruídos dos pneus/pavimento no ruído de tráfego. O método fornece resultados próximos da realidade, sendo que a precisão pode ser aumentada se várias repetições (passagens) forem feitas.

A harmonização com outros métodos é grande, desde que o método “coast-by” seja adaptado a partir dos métodos engrenados (com o motor do veículo ligado e em condição de marcha) ISO 362 e 7188. O método pode ser utilizado tanto para avaliação de pneus de carros quanto de caminhões.

As vantagens deste método “tradicional” são a facilidade e simplicidade de execução, uma vez que não necessários equipamentos extras, além de um veículo e um analisador sonoro. As desvantagens são as influências causadas pelo tipo de veículo e condição de teste, bem como o número de pneus necessários para o teste.

Método Trailer – Este método requer uma menor quantidade de pneus do que o método “coast-by” visto anteriormente, não sendo sensível ao ruído de tráfego. O pneu de teste é montado em um *trailer* que é puxado por um automóvel. Próximo ao pneu de teste está localizado um ou mais microfones, geralmente entre 10 e 50 cm do pneu. O nível de ruído gravado é uma média sobre um período de tempo geralmente entre 4 e 60 segundos. Muitos *trailers* possuem um enclausuramento em torno do microfone e do pneu de teste, proporcionando uma proteção contra o vento e o ruído de tráfego. Alguns *trailers* podem usar um ou mais pneus de teste. A Figura 11 A e B mostra uma foto de um teste usando o método trailer.

As maiores desvantagens do método *trailer* são a falta de representatividade das medições e o problema do ruído de fundo. O ruído é medido no campo próximo, ao passo que, na realidade, as pessoas percebem o ruído no campo distante. Além disso, a diretividade dos pneus pode implicar que o ruído medido pelos microfones seja diferente do ruído ouvido próximo a rodovias, por exemplo.

Com relação à precisão, o método *trailer* é superior ao método do tambor. O tempo de medição pode ser grande, limitado, em muitos casos, pelo comprimento da pista de testes. A harmonização com os demais métodos é pequena (com exceção do método do tambor).



Figura 11A: Ensaio de ruído usando o método *Trailer*. [9]



Figura 11B: O *Trailer* da UFSC - Brasil

Uma outra desvantagem do método é a necessidade de equipamentos caros para a medição. Além disso, o método é sensível a vários tipos de distúrbios, necessitando testes periódicos. Estes distúrbios estão relacionados a reflexões acústicas no enclausuramento e ruído de fundo. O ruído de fundo pode ser um sério problema deste método, e medições abaixo de 200 Hz são questionáveis devido aos efeitos de reflexão.

O nível de ruído de fundo pode ser difícil de controlar em todos os tipos de *trailers* disponíveis, dificultando o uso do método para classificação de pneus em função da legislação. Dependendo de como o *trailer* é construído, este método pode exigir pistas de testes mais espaçosas do que o método “coast-by” ou até mesmo pistas circulares. No entanto, uma vez que a pista de teste está disponível, o teste é muito rápido e eficiente. Se um enclausuramento é usado em torno do pneu de teste e dos microfones, as exigências com relação ao nível de ruído externo podem ser relaxadas. Além disso, não existem exigências especiais quanto ao ambiente da pista de teste, tais como ausência de objetos de reflexão sonora, etc.

Método do tambor em laboratório – Este método utiliza um tambor como superfície de rolamento. Tambores com diâmetro entre 1,5 e 2,5 m são os mais comuns. O pneu de teste é montado na bancada de tal modo que ele possa rolar sobre o tambor, e microfones são montados próximos ao pneu, em princípio nas mesmas condições do método trailer. Cuidados especiais devem ser tomados com relação ao ambiente acústico. É absolutamente necessário ter um tambor equipado com uma superfície de rolamento que se assemelhe com um pavimento real. A Figura 12 mostra uma foto de um equipamento de teste para o método do tambor.

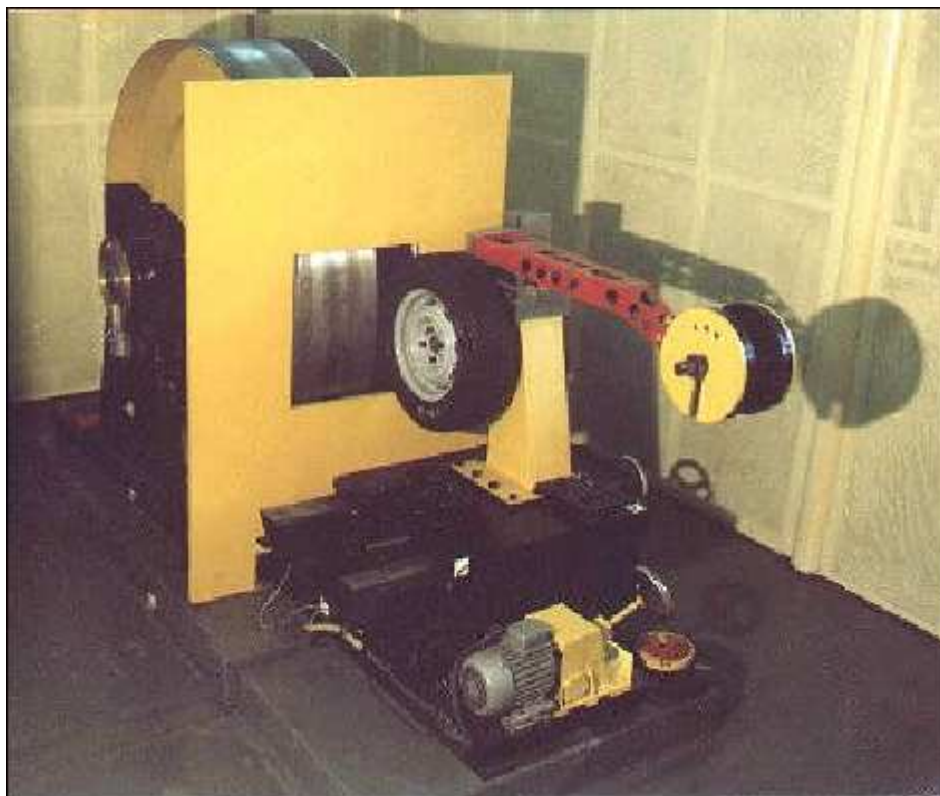


Figura 12: Tambor para teste de ruído em pneus. [9]

Por ser um método de laboratório, a maior vantagem reside na independência com relação às condições climáticas. Entretanto, a maior desvantagem do método é a representatividade dos resultados. Primeiramente, o ruído é medido no campo próximo, acarretando os mesmos efeitos já descritos para o método trailer. A curvatura do tambor também pode ser um fator de influência no ruído gerado pelo pneu, embora já se tenham trabalhos que mostrem que esta influência não é assim tão significativa. Devido a estes problemas, a utilização deste método para classificação de pneus é menos representativa do que com o método “coast-by”. No entanto, o método fornece resultados precisos e repetitivos devido à possibilidade de controle das variáveis envolvidas. Além disso, os tempos médios durante as medições podem ser longos, minimizando erros aleatórios.

Uma característica positiva é a de que a mesma réplica de textura de pavimento pode ser utilizada por vários tambores ao redor do mundo, facilitando as comparações entre ensaios. Uma pequena desvantagem é que pneus com pregos ou tachões (para neve) não podem ser testados, pois danificam a superfície do tambor.

A harmonização com outros métodos é pequena, sendo que os resultados não podem ser comparados com os obtidos pelo método “coast-by”. Além disso, o método não pode ser utilizado para classificação de superfícies. As medições são simples, práticas e rápidas, uma vez tendo o equipamento disponível. O método é de operação barata, mas o custo da implementação da bancada com tambor geralmente é alto.

Método “coast-by” usando trailer – Este método é uma combinação entre os métodos “coast-by” e *trailer*. Um *trailer* é puxado por um veículo ao longo de uma pista de teste e os microfones estão posicionados de acordo com o método “coast-by”. Entretanto, o ruído a ser gravado é o ruído que ocorre quando o *trailer* está passando, isto é, o ruído deve ser gravado no momento em que o veículo que puxa o *trailer* está próximo do microfone. O problema de separação do ruído emitido pelo veículo de tração e o ruído

emitido pelo *trailer* pode ser minimizado utilizando-se uma ligação longa entre o veículo e o *trailer*, além da utilização de pneus silenciosos e cobertos para o veículo de tração. Pode-se, ainda, fazer uma medição de ruído somente com a presença do veículo de tração, utilizando o resultado como correção para a medição com o *trailer*. A Figura 13 mostra um exemplo de um *trailer* utilizado neste método.



Figura 13: Exemplo de *Trailer* utilizado no método híbrido (coast-by com trailer).

A representatividade dos resultados obtidos com este método é um pouco pior do que para o método cast-by puro, mas superior aos métodos do tambor e *trailer*. O método é menos influenciado pelas características do veículo de teste do que o método coast-by, sendo esta uma das grandes vantagens. A utilização deste método para classificação de pneus também não é muito indicada, uma vez que pneus mais silenciosos serão mais influenciados pelas características do veículo de tração do que pneus mais ruidosos. A repetibilidade do teste é dificultada pela utilização do veículo de tração e pela dificuldade de se obter condições semelhantes de teste para diferentes passagens. Se correções forem utilizadas para o ruído provocado pelo veículo de tração, o número de medições necessárias pode ser duplicado em alguns casos. A harmonização com outros métodos é pior do que para o coast-by puro. O método não é indicado para testes com pneus de automóveis, desde que *trailers* com ligação longa até o veículo de teste induzem carregamentos grandes nos pneus.

Existe também a possibilidade de avaliações do ruído de pneus/rolagem em pistas, utilizando-se conjuntos de microfones em torno do pneu do veículo, enquanto este se movimenta em condições reais de utilização. A Figura 14 mostra um esquema de montagem de microfones para este tipo de avaliação. Estes métodos, embora pouco controlados, podem fornecer informações interessantes sobre o campo sonoro formado em torno do pneu do veículo, o que auxilia no projeto de desenvolvimento de um pneu para uma determinada aplicação (veículo/pavimento).



Figura 14: Posicionamento de microfones para medição do ruído do pneu durante o movimento do veículo. [7]

4. Métodos de avaliação e pesquisa em laboratório

Em conjunto com os métodos normatizados disponíveis para avaliação de emissão, regulamentação e classificação dos pneus e superfícies (pavimentos) com relação aos níveis de ruído, uma variedade de técnicas experimentais de laboratório está disponível para pesquisa e desenvolvimento de produtos.

Ao contrário dos métodos normatizados, estes experimentos destinam-se a obtenção de informação que auxiliem o melhor entendimento dos fenômenos físicos relacionados à geração do ruído pelos pneus.

A caracterização do campo sonoro em torno dos pneus dentro de câmara anecóica é um método bastante utilizado durante o desenvolvimento de pneus. Através da visualização da distribuição espacial dos níveis de pressão sonora em torno do pneu, fontes localizadas de ruído podem ser controladas mediante alterações de projeto. Além disso, diferentes bandas de rodagem podem ser avaliadas através de métodos controlados, permitindo que a influência destes parâmetros possam ser analisados isoladamente. A Figura 15 mostra um esquema de experimento de caracterização do campo sonoro de um pneu, montado no interior de uma câmara anecóica. A Figura 16 mostra resultados típicos obtidos com este tipo de análise, onde podem ser localizados pontos de elevado nível de pressão sonora situados próximos a determinadas regiões do pneu.

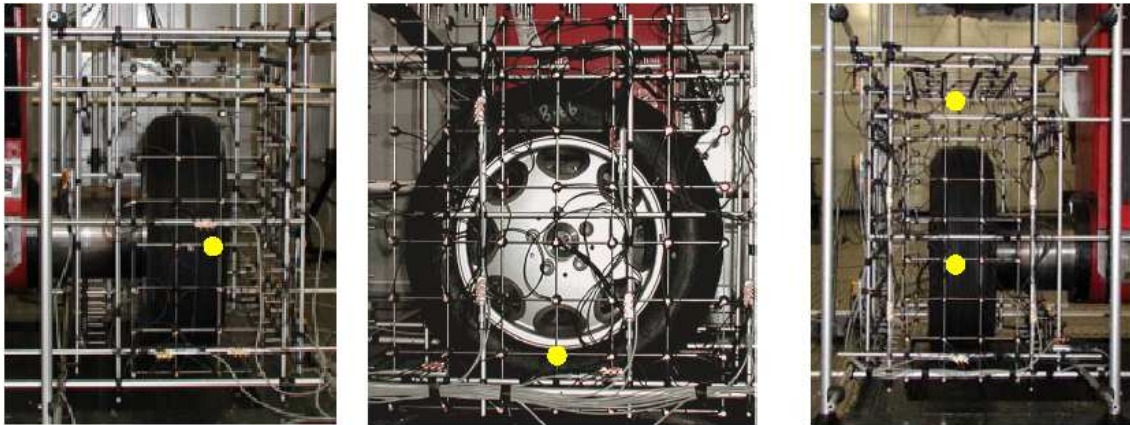


Figura 15: Caracterização do campo sonoro em torno do pneu em câmara anecóica. [4]

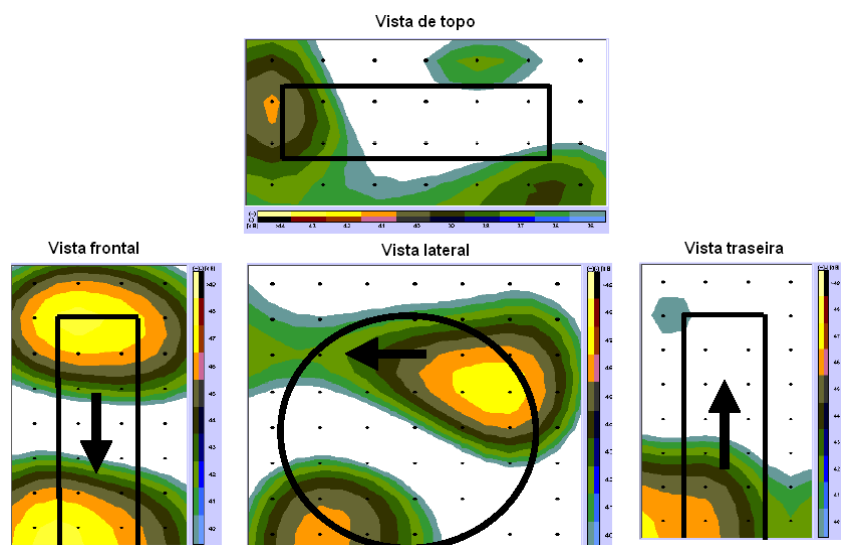


Figura 16: Campo sonoro em torno do pneu, para uma determinada frequência. [4]

Outra técnica bastante utilizada é a medição da intensidade sonora próxima ao pneu, em condições de rolamento e dentro de câmaras anecóicas, utilizando-se sondas. Através da utilização de um vibrômetro laser, os modos de deflexão operacionais de um pneu em rolamento podem ser obtidos, bem como espectros de velocidade de vibração superficial. Através da comparação dos resultados de velocidade de vibração, intensidade sonora e modos de vibração operacionais, pode-se determinar as frequências de geração de ruído e associá-las aos respectivos modos de vibração da estrutura do pneu, facilitando ações de controle de ruído através de modificações de projeto. A Figura 17 mostra uma comparação entre um espectro de vibração da carcaça do pneu e o espectro de intensidade sonora. Nota-se uma concordância ente a vibração e a intensidade em torno de 140 Hz. Com os resultados da análise de deflexão operacional, nota-se que esta frequência está associada com um modo da carcaça, como mostra a Figura 18.

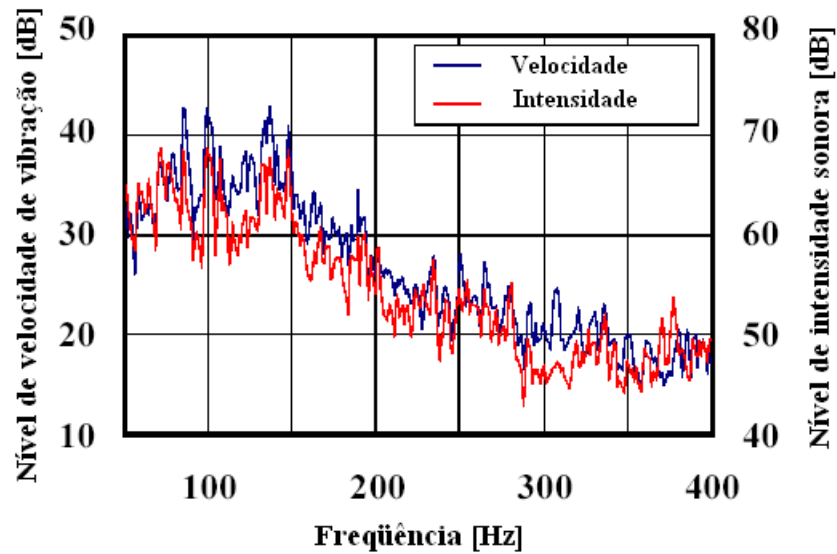


Figura 17: Comparação entre nível de velocidade de vibração e intensidade sonora. [5]

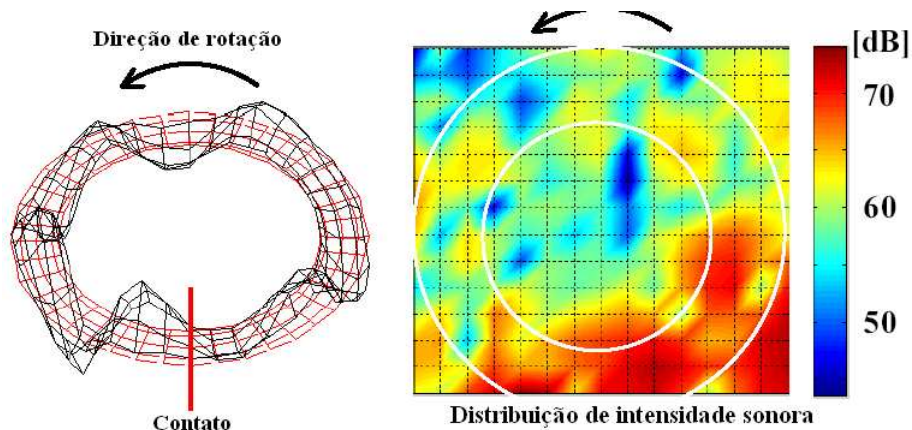


Figura 18: Forma de vibração operacional e distribuição de intensidade sonora em 140 Hz. [5]

Atualmente, em adição aos métodos tradicionais já apresentados, estudos relacionados à qualidade sonora vêm sendo implementados para o ruído emitido pelos pneus. Experimentos em câmaras anecóicas para pneus em condições de rolamento são feitos para que o ruído gerado seja gravado através de um torso, como mostrado na Figura 19.

A gravação é feita de forma binaural (dois canais independentes) e depois reproduzida para um júri, que julga e fornece notas comparativas para os diferentes pneus e/ou alterações avaliadas.



Figura 19: Gravação binaural do ruído dos pneus usando torso. [3]

5. Métodos numéricos

Com o desenvolvimento dos computadores e métodos computacionais de simulação, a pesquisa e desenvolvimento vibroacústico de estruturas têm apresentado grandes avanços. No caso dos pneus, vários métodos numéricos, determinísticos e estatísticos vêm sendo utilizados na previsão do comportamento vibroacústico, permitindo que a avaliação de medidas de controle de ruído sejam implementadas ainda na fase de projeto, minimizando custos com experimentos.

Dentre os métodos numéricos disponíveis, o Método dos Elementos Finitos (FEM), Métodos dos Elementos de Contorno (BEM) e Análise Estatística de Energia (SEA) são os mais utilizados para a análise do ruído emitido pelos pneus.

Através do Método dos Elementos Finitos, modos estruturais da carcaça do pneu, bem como os modos acústicos da cavidade, podem ser previstos facilitando o projeto do pneu na tentativa de evitar os fenômenos de acoplamento estrutura-cavidade para as condições de utilização do pneu. A Figura 20 mostra modos estruturais da carcaça obtidos por FEM para um pneu.

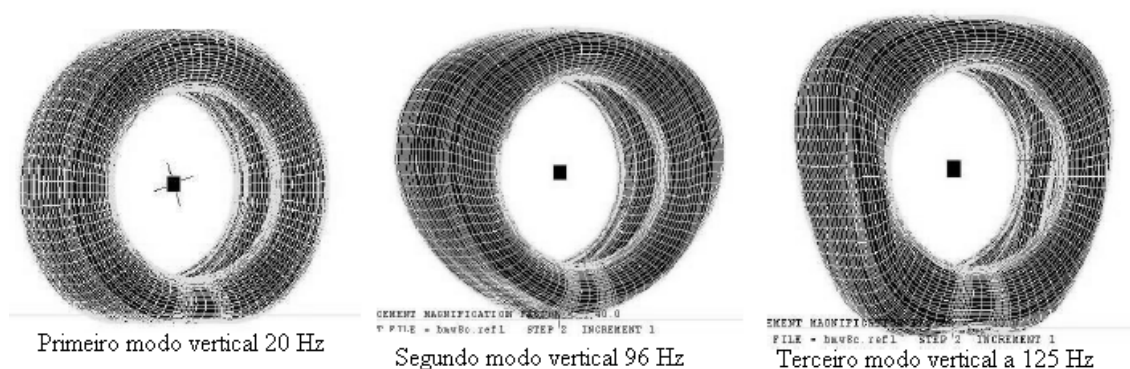


Figura 20: Modos de vibração da carcaça do pneu obtidos por FEM. [11]

O Método dos Elementos de Contorno (BEM) permite a simulação do campo sonoro externo ao pneu, bem como a distribuição de pressão sonora na superfície da carcaça, utilizando como dados de entrada as velocidades de vibrações superficiais. Estes dados de entrada podem ser obtidos tanto experimentalmente (vibrômetros laser,

para condições de operação ou acelerômetros, para condições estáticas) ou numericamente (FEM). A Figura 21 mostra a distribuição de pressão sonora na superfície do pneu obtida por um modelo em BEM.

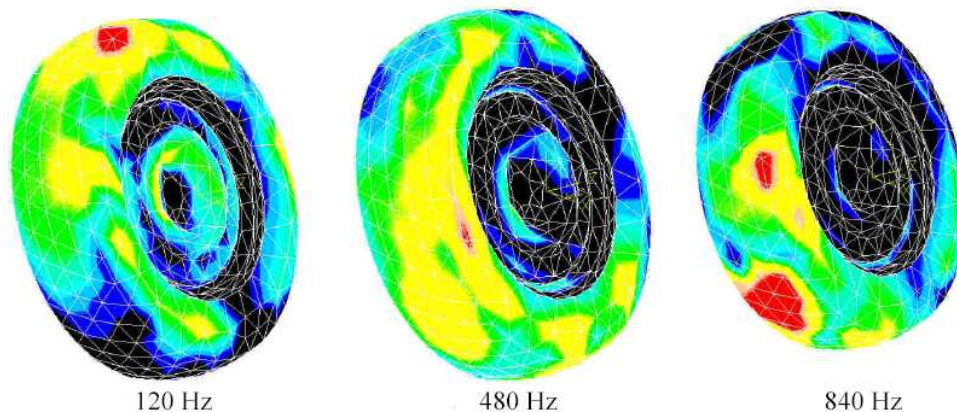


Figura 21: Distribuição de pressão sonora na superfície do pneu obtida usando o Método dos Elementos de Contorno. [3]

6. Absorção sonora de misturas asfálticas

Os ensaios acústicos para determinar o coeficiente de absorção sonora foram realizados de acordo com o procedimento especificado na ISO 10534-2:1998 E. O ensaio consistiu em excitar o tubo de impedância com ruído branco e medir a pressão sonora no seu interior. O processo de medição foi baseado na interação de ondas planas incidentes e refletidas. Com isso foi possível determinar a curva do coeficiente de absorção sonora em função da frequência de cada amostra de asfalto. A Figura 22 mostra a colocação da amostra dentro do tubo de impedância e os equipamentos utilizados para a realização do ensaio de absorção sonora.

A frequência de corte foi de 2009 Hz para o tubo de impedância com diâmetro de 10 cm. Abaixo desta frequência tem ondas planas e as medições são válidas. Para a distância dos microfones de 50 mm foi obtida uma faixa de frequência válida de medição entre 343 e 2744 Hz.



Figura 22- Sistema de medição de coeficiente de absorção sonora da UFSC - Brasil

A Figura 23 mostra a influência do diâmetro máximo do agregado na absorção sonora e a Figura 24 mostra a absorção sonora da estrada de dupla camada, cada camada projetada para uma faixa de frequência diferente.

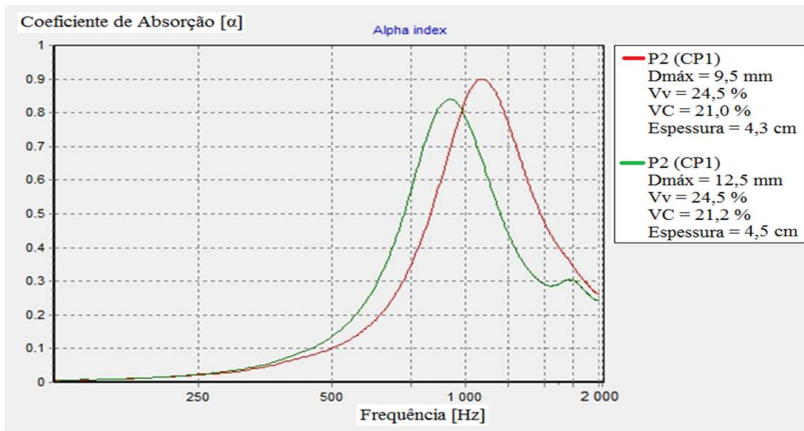


Figura 23: Influência do diâmetro máximo do agregado no pico e frequência de absorção sonora [13].

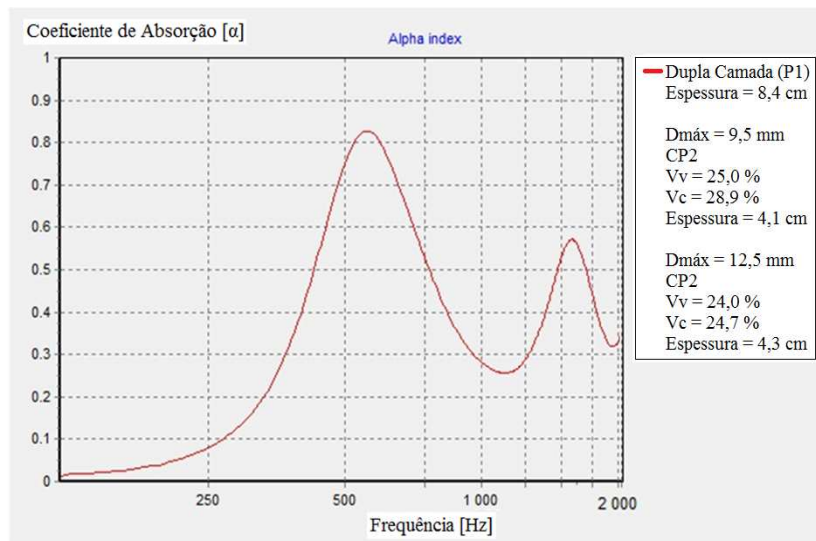


Figura 24: Influência da dupla camada na absorção sonora [13].

7. Redução de ruído pneus/estrada

Soluções para redução de ruído de pneus/estrada não podem ser discutidos isoladamente, mas devem ser considerados todos os aspectos da resistência de deslizamento das estradas, segurança, desgastes, etc.

A integração de baixo ruído de superfícies com outras medidas de mitigação envolve um grande número de parâmetros que afeta o ruído do tráfego total. A Figura 25 mostra o resumo de alguns fatores que o ruído do veículo afeta pneu/estrada. Além dos parâmetros do veículo e do pneu, as condições locais e do pavimento, também desempenham um papel importante. Na verdade as propriedades da superfície da

estrada podem conduzir a uma relação completamente diferente entre certos parâmetros dos pneus e do ruído do tráfego.

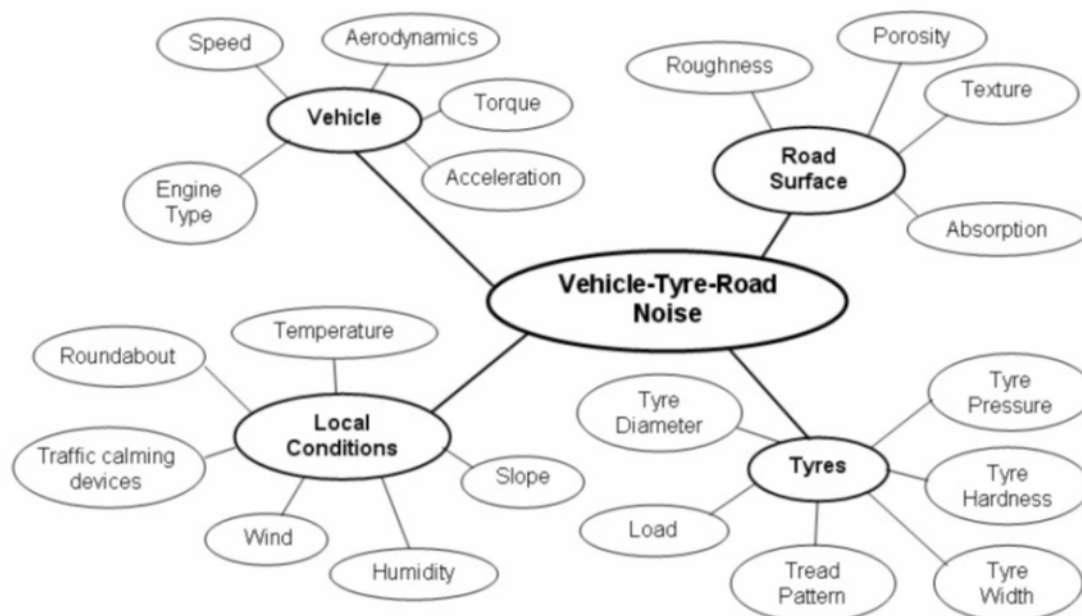


Figura 25- Influências de propriedades de veículos, de pneus, e estrada de superfície sobre o ruído

A seguir são apresentados alguns princípios para redução de ruído.

1- Estrada com porosidade

Os revestimentos asfálticos drenantes são misturas asfálticas caracterizadas pelo elevado volume de vazios, obtidos por meio de uma dosagem adequada de agregados minerais britados e cimentos asfálticos puros ou modificados por polímeros. Os vazios da mistura são comunicantes permitindo a percolação da água superficial proveniente das precipitações chuvosas, resultando num revestimento dito drenante ou permeável. Devido à elevada percentagem de vazios da mistura, o ar situado à frente do pneu tende a penetrar nestes poros, reduzindo o bombeamento do ar. Com a redução do bombeamento do ar, obtém-se a diminuição do ruído, cuja ordem de grandeza é dependente de diversos fatores tais como o tamanho dos agregados, a espessura da camada e a percentagem de vazios da mistura (SWART, 1997 *apud* MEURER, 2001). A Figura 26 ilustra o processo de penetração da bolsa de ar situada à frente do pneu nos poros vazios do concreto asfáltico drenante.

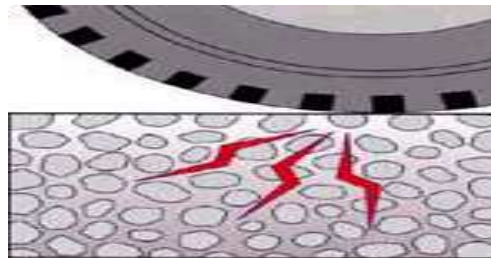


Figura 26 - Penetração do ar nos vazios do concreto asfáltico drenante

O coeficiente de absorção acústica deste tipo de revestimento, nos intervalos 0-700, 700-1250 e 1250-2000 Hz, alcança, respectivamente, os valores mínimos de 0,00; 0,20 e 0,55 que podem atingir 0,20; 0,45 e 0,6 em função da espessura do revestimento, da quantidade e da distribuição dos vazios comunicantes e da disposição dos agregados na superfície, que são os fatores que influenciam a geração do ruído. Uma característica fundamental das superfícies drenantes é o elevado volume de vazios comunicantes (20-28%) que proporcionam a circulação de água e a absorção de ruído de superfície.

2- Atenuação de ruído pelo Ressonador de Helmholtz

A Figura 27 mostra o mecanismo de atenuação usando ressonador de Helmholtz. Os três elementos são: a massa na garganta, o efeito de mola do ar dentro da cavidade e o atrito na vibração de ar, na frequência ressonância na garganta. Através do ajuste dos parâmetros, é possível ter atenuação máxima na frequência de maior ruído (entre 800 a 1000 HZ), dada pela seguinte equação:

$$\omega = C. \text{Raiz}(S/(L'.V))$$

Onde :

$$L' = L + \frac{16a}{3\pi}$$

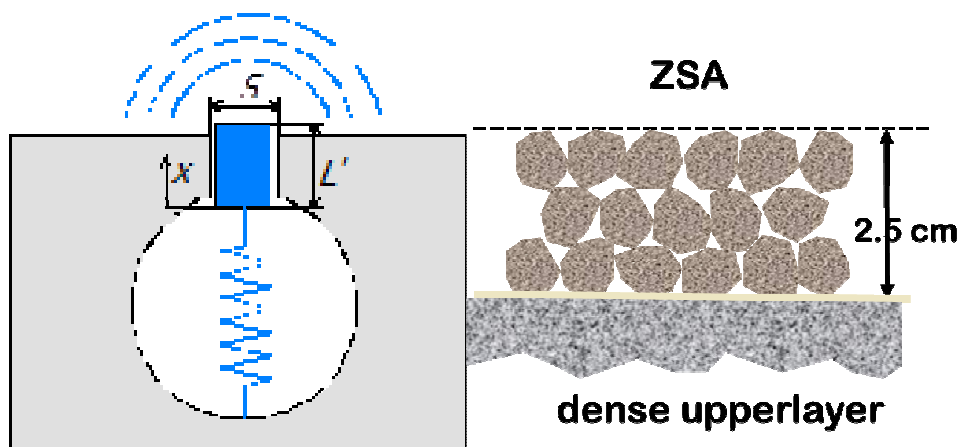


Figura 27: Mecanismo de absorção pelo Ressonador de Helmholtz

3 – Pneus especiais

Pneus não convencionais, sem sistemas pneumáticos, feitos de materiais especiais mostram uma redução de até 10 dBA em comparação a pneus comuns [Sandburge 2002]. Um pneu desenvolvido pela Michelin chamado ‘TWEEL’ em 2005 é mostrado na Figura 28.



Figura 28- Pneus não pneumáticos apresentados pelo Michelin em 2005 [14]

Outro desenvolvimento para redução de ruído através de pneus é feito de materiais porosos, que podem contribuir para a absorção acústica. Além de boa resistência na rolagem e boa fricção em estrada molhada tem a desvantagem de vida útil curta (ver Figura 28).



Figura 29- Dois protótipos de pneus porosos (esquerda) em comparação com pneus normais (direita) [14]

8. Conclusões

Ruído de pneus/rolagem tem grande influencia na qualidade sonora veicular. O ambiente acústico dentro da cabine de passageiros é um argumento comercial muito importante: veículos que são silenciosos internamente são considerados mais confortáveis e fornecem uma sensação de luxo. Além disso, um dos argumentos de reclamação mais frequente em termos de veículos novos refere-se a problemas de ruído. Durante o período de 1976 a 1985, para os carros de 1,5 a 1,8 litros de cilindrada do Japão, o nível de ruído a 100 km/h sofreu uma queda de 8 dBA.

Este progresso em termos de ruído interno é, provavelmente, uma combinação de esforços relacionados a melhorias no veículo e nos pneus, pois se sabe que, para esta velocidade, o nível de ruído dos pneus é predominante. Com relação ao ruído externo, os argumentos de conforto e luxo são mais fracos, uma vez que este ruído não causa influência no dono do veículo. No entanto, muitas políticas governamentais têm proposto regulamentações e diretrizes para limitar os níveis de ruído emitidos pelos veículos.

As primeiras regulamentações a este respeito eram ainda bastante liberais, e se limitavam a propor diretrizes para o ruído proveniente do trem de força. Além do mais, as exigências sempre foram maiores para caminhões e ônibus, o que culminou com o maior desenvolvimento destes veículos, ao contrário dos automóveis leves. Com isso, limites não foram diretamente especificados para o ruído dos pneus/rolagem, o que explica porque atualmente não se notam significativas reduções do ruído de tráfego em altas velocidades, onde o ruído dos pneus é dominante.

Ao longo dos últimos anos, o ruído dos caminhões decresceu significativamente em baixas velocidades, ao passo que o ruído dos carros aumentou para altas velocidades como mostra a Figura 30.

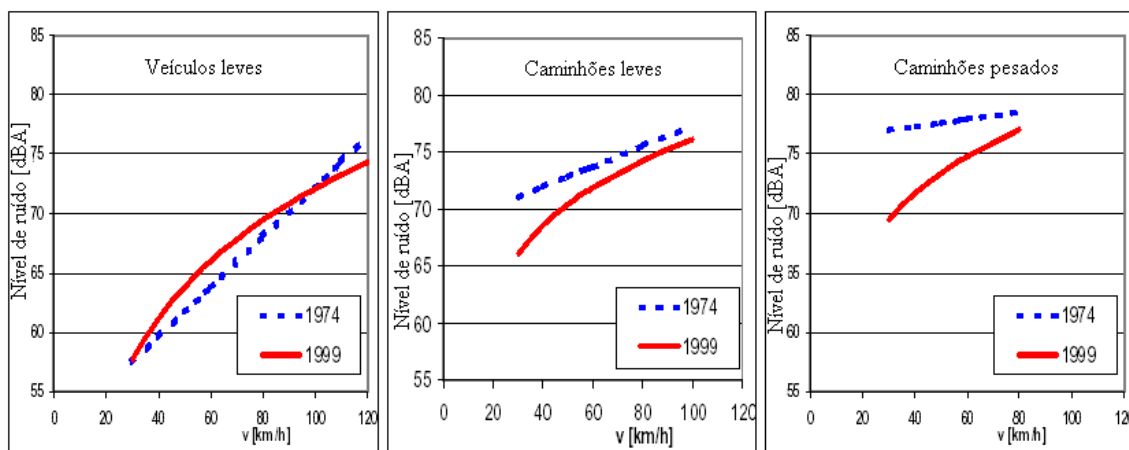


Figura 30: Comparação entre as emissões de ruído entre 1974 e 1999 para carros de passeio, caminhões leves e pesados. [1]

Portanto, a redução do ruído dos pneus/rolagem desponta como um dos maiores desafios da indústria automobilística e de pneus para a próxima década, principalmente no que tange a diminuição do ruído externo (ruído de tráfego). O revestimento da estrada seja asfalto, concreto, misturas tem grande influencia no ruído de acoplamento. O ruído dos carros elétricos é principalmente o acoplamento pneus/estrada.

Várias são as ferramentas disponíveis para a pesquisa e o desenvolvimento dos produtos nesta área, sejam elas de avaliação experimental ou numérica. A necessidade da utilização destas ferramentas por parte da indústria depende do nível de exigência da legislação de ruído com relação aos veículos automotores.

Referências

- [1] Sandberg, U., “Tyre/road noise – Myths and realities”, Proceedings of Internoise 2001, 2001.
- [2] Sandberg, U., Ejsmont, J. A., “The art of Measuring Noise from Vehicle Tires”, SAE Paper 931275, 1993.
- [3] Ge, J., Wang, Z., Long, Y., Wang, W., Mao, D., “Application of Tire/Road Noise in Tire Design”, SAE Paper 2002-01-1237, 2002.
- [4] Saemann, E. U., “Sound field investigations around a tire”, Proceedings of Internoise 2002, 2002.
- [5] Tsujiuchi, N., Koizumi, T., Maeda, Y., “Application of Operational Modal Analysis to a Rolling Tire Noise Prediction”, Proceedings of Internoise 2002, 2002.
- [6] Klos, J., Han, F., Bernhard, R. J., “Response measurement of rolling tires using laser Doppler vibrometry”, Proceedings of Internoise 2002, 2002.
- [7] Brüel & Kjaer Application Note: Tyre Noise Measurement on a Moving Vehicle.
- [8] Iwao, K., Yamazaki, I., “A study on the mechanism of tire/road noise”, JSAE Review 17(1996), pp. 139-144.
- [9] Sandberg, U., Ejsmont, J. A., “Noise Emission, Friction and Rolling Resistance of Car tires – Summary of an Experimental Study”, Noise-Con 2000, 2000.
- [10] Tyres – coast-by-method for measurement of tyre/road sound emission, Informal document No. 4, 35th GRB, 13-14 September 2001, agenda item 1.
- [11] Constant, M., Leyssens, J., Penne, F., Freymann, R., “Tire and Car Contribution and Interaction to Low Frequency Interior Noise”, SAE Paper 2001-01-1528, 2001.
- [12] Samir N. Y. Gerges, Ruído: Fundamentos e Controle. NR editora, 2 edição, 2000.
- [13] Ramon Mendes Knabben, dissertação de mestrado, UFSC, Brasil, Estudo do Ruído Pneu/Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento, 2012.
- [14] SANDBERG, U.; EJSMONT J. Tyre/Road Noise Reference Book. Informex, Kisa, Sweden, 2002.