

Verificar através da análise estrutural a máxima redução de massa de uma lombada (quebra-molas) confeccionada em borracha atendendo as especificações técnicas de carregamento

Junior dos Santos Puga¹, Lucas Marques Dias¹, Victor Weckwerth Quadra¹
(puga.jupuga@gmail.com), (lucasmadidas1@gmail.com), (victorwquadra@hotmail.com)

Professora orientadora: Dra. Daniele da Silva Domingos

Coordenação de curso de Engenharia Mecânica: Márcio J. K. Senhorinha

Resumo

A alta do mercado de vendas de lombadas confeccionadas em borracha, estas utilizadas em ambientes de circulação restrita, fez surgir o interesse em fazer um projeto a fim de descobrir maneiras de diminuir custo e contribuir com o meio ambiente, questões de extrema importância no mercado de qualquer produto. Dessa forma, analisou-se como poderia reduzir a massa dessas lombadas. Com o uso de *softwares* e análise de elementos finitos em uma determinada geometria de lombada, acrescentando furos na mesma a fim de reduzir a massa, descobriu-se que para esta determinada geometria, pode-se reduzir por volta de 30% de massa de formulação de borracha, bem como no preço. Com a estimativa de vendas do mercado nos próximos cinco anos, esses valores podem representar algo em torno dos quinhentos mil reais, bem como uma média em torno de 16 toneladas ao ano que pode ser deixada de ser descartado em aterros, contribuindo com o meio ambiente.

Palavras-chave: Lombada. Borracha. Análise estrutural. Elementos finitos. Meio ambiente.

1. INTRODUÇÃO

As lombadas confeccionadas em borracha surgiram devido a necessidade de um produto compacto e de fácil instalação, a fim de diminuir a velocidade em ambientes de circulação restrita, como estacionamentos privativos e pátios de manobras, onde a velocidade não ultrapassa 20 km/h. Seu uso é exclusivo para estes locais, pois não atenderiam as especificações exigidas para utilização em vias públicas (CONTRAN, 2021).

As lombadas confeccionadas em borracha são amplamente utilizadas em estacionamentos de shoppings e grandes redes de supermercados. É um produto versátil que consegue atender diferentes necessidades de instalação, seja em ambientes fechados como garagens de apartamentos, ou grandes áreas abertas como pátios de movimentação de cargas. E, também, é um dispositivo que atende o propósito para que foi criado, que é a redução da velocidade de veículos no ambiente onde é instalada (CONTRAN, 2021).

De maneira geral, possui um custo elevado devido ao material e ao processo ao qual é fabricada. Como é um produto que pode ficar exposto a ação de intempéries e sujeito a grandes carregamentos sobre sua estrutura, se faz necessário a utilização de materiais que possam atender a estas exigências, como a borracha SBR (Borracha de Estireno Butadieno), que possui uma excelente resistência ao rasgo, ao impacto e a abrasão, porém é muito fraca para resistir a óleos e gasolinas. Para isso, também se utiliza em sua formulação a borracha NBR (borracha de acrilonitrilo butadieno), que é excelente na resistência a óleos e gasolinas,

¹ Graduação em Engenharia Mecânica – UniSociesc Campus Joinville.

além da utilização de diversos outros produtos químicos a fim de melhorar a estrutura do produto (CAETANO, 2023).

Tendo como base a crescente concorrência no mercado, forçando empresas a encontrarem meios de se manterem “vivas”, seja criando ou adaptando seus produtos, linhas de fabricação, políticas de produção, entre outros, um estudo para aperfeiçoar a produção de um item robusto confeccionado com matéria prima não renovável e de alto valor agregado se faz necessário.

Utilizando os conceitos da análise de MEF (método dos elementos finitos) com o auxílio do *software SolidEdge®* do fabricante SIEMENS na sua versão gratuita para estudantes (*Solid Edge® Student Edition*), o objetivo geral é a análise estrutural da geometria definida de uma lombada de borracha (Quebra-Molas), verificando o quanto é possível reduzir sua massa através da inclusão de furos ao longo de sua região de maior massa atendendo as especificações de carregamento estabelecidas para a aplicação do produto. (SIEMENS, 2023).

Com este estudo será possível determinar o quanto de redução será gerado nos custos de fabricação do produto, tornando-o mais barato e mais competitivo com produtos similares do mercado, além de verificar o quanto de material será deixado de ser descartado em aterros, contribuindo assim com o meio ambiente.

Desta forma os objetivos específicos são a utilização de *software* para analisar a estrutura de uma lombada confeccionada em borracha verificando se a alteração de sua geometria inicial com a inclusão de furos atendera a solicitação de carregamento necessária para sua aplicação, verificar o quanto de redução será possível obter em seu custo de fabricação, verificando assim o ganho total gerado para a fábrica, além da redução de preço do produto ao cliente. E por fim verificar através dos resultados obtidos com a redução de massa do produto, os valores quantitativos de componentes poluentes ao meio ambiente que será possível retirar dos meios de descarte nos próximos 60 meses, contribuindo assim para a preservação do meio ambiente.

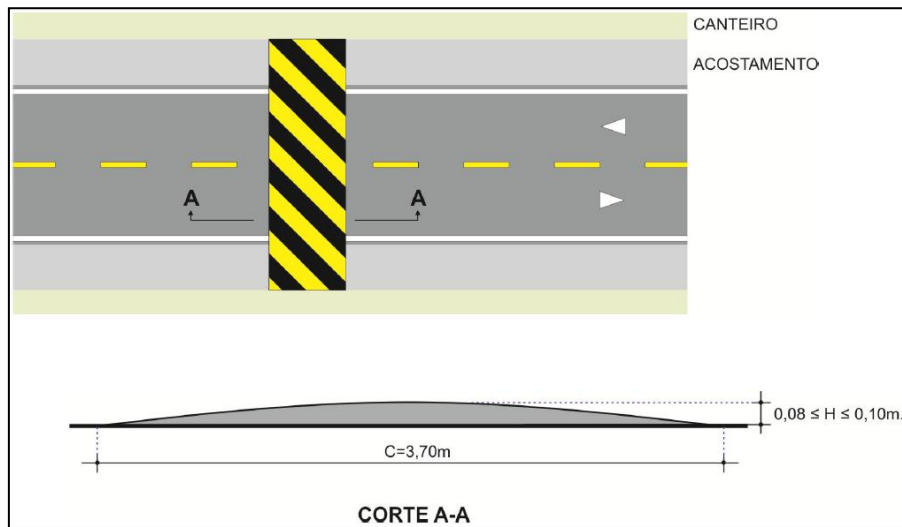
2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Lombada ou “Quebra-Molas”

Lombadas ou “Quebra-Molas” são ondulações instaladas transversalmente ao eixo da via de circulação de veículos a fim de reduzir a velocidade dos mesmos, podendo ser construída com material asfáltico, concreto ou outro material que garanta suas características físicas (CONTRAN, 2021).

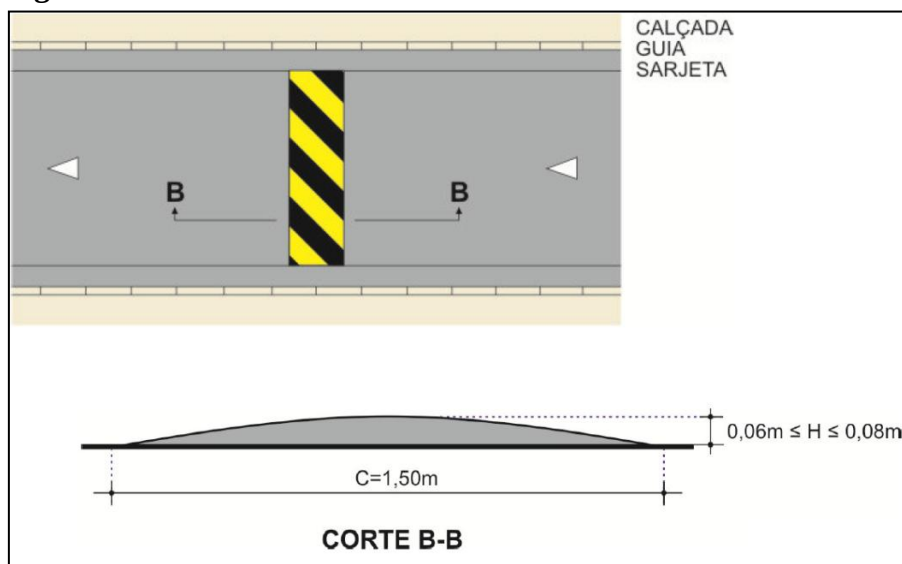
A lombada aplicada em vias públicas pode ser apenas de dois tipos. **TIPO A:** aplicadas em vias onde o limite de velocidade não pode ultrapassar 30 km/h, tais como via rural, via urbana coletora e via urbana local, e sua construção deve atender os requisitos específicos (Figura 1). **TIPO B:** Aplicadas em vias onde o limite de velocidade não pode ultrapassar 20 km/h, tais como vias urbanas local, onde não possa implementar as lombadas do **TIPO A** e sua construção também deve atender requisitos específicos (Figura 2) (CONTRAN, 2021).

Figura 1 – Lombada TIPO A



Fonte: (CONTRAN, 2021)

Figura 2 – Lombada TIPO B



Fonte: (CONTRAN, 2021)

Uma lombada só pode ser implementada em via pública com autorização de uma autoridade de trânsito com circunscrição sobre a via e com base em estudos realizados por técnicos de engenharia de tráfego, e só será aplicado caso o estudo demonstre risco significativo ou potencial de acidentes, tendo como fator determinante o excesso de velocidade (CONTRAN, 2021).

2.2 Borracha

A borracha, também conhecida como elastômero, é um material cuja sua estrutura é composta por uma longa cadeia polimérica. Pode ser dividida em borracha natural e borracha sintética. A borracha natural é obtida do látex extraído de seringueiras. Já a borracha sintética é obtida a partir de derivados de petróleo (GENT, 2012).

A propriedade mais interessante dos materiais elastoméricos é a sua elasticidade, onde podem ser deformados a limites bastante grandes e retornarem ao seu estado inicial da mesma

forma como uma mola quando pressionada retorna a seu estado inicial. Uma peça produzida com borracha terá a mesma reação quando comprimida ou estendida (WILLIAM, 2020).

Quando um material elastomérico está em seu estado isento de tensões, ele será amorfo, onde suas cadeias de moléculas com ligações cruzadas estarão torcidas, dobradas e espiraladas. Quando se é aplicado uma força, estas cadeias de moléculas se desenrolam, desdobram e estreitam no sentido da força. Ao cessar esta força, as cadeias de moléculas se enrolam, se dobram e se espiralam novamente, voltando ao seu estado inicial (WILLIAM, 2020).

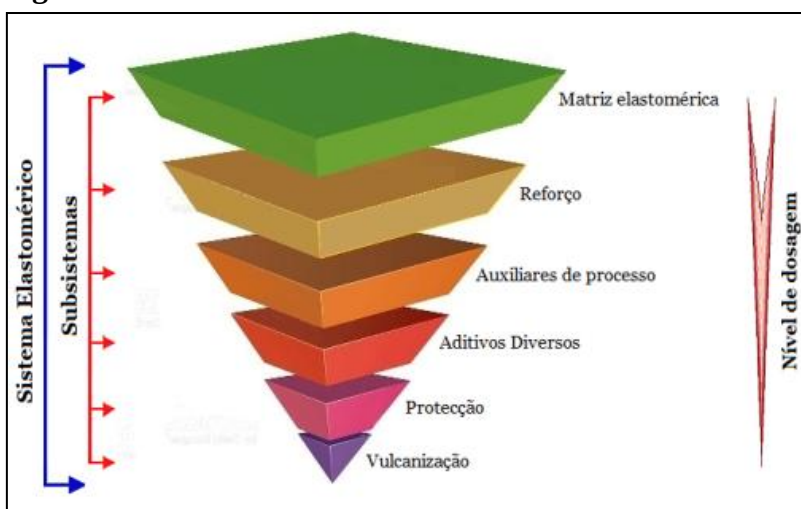
O processo responsável em promover a formação das ligações cruzadas em um material elastomérico é a vulcanização. Esse processo é realizado por meio de reação química de estado irreversível. Desta forma, quando uma borracha é submetida ao processo de vulcanização torna-se impossível reverter ao seu estado anterior a vulcanização (WILLIAM, 2020).

Para que uma borracha vulcanize é necessário o emprego de temperaturas elevadas para que a reação química resulte nas cadeias de moléculas com ligações cruzadas. Para que uma borracha possa vulcanizar e atingir as propriedades esperadas, é preciso um composto de borracha, mais conhecido como formulação de borracha, que nada mais é do que a união de vários produtos químicos com a base elastomérica principal. Alguns desses produtos são agentes de reticulação, reforços anti-degradantes e auxiliares de processo (GENT, 2012).

Uma formulação de borracha é composta por vários produtos químicos, que são misturados em equipamentos específicos a fim de deixar a formulação mais homogênea possível. Cada produto químico acrescentado na formulação da borracha tem sua função específica, tais como proporcionar resistência a chama, proporcionarem lubrificação externa ao produto pós-vulcanizado, aceleradores de vulcanização, entre outros. Estes produtos químicos são acrescentados em proporções devidamente estudadas e ajustadas (CAETANO, 2023).

Alguns dos produtos químicos utilizados na formulação da borracha são os plastificantes, antioxidantes, antiozonantes, ceras de proteção, ácidos gordos, óxidos metálicos, aditivos diversos, agentes de vulcanização, aceleradores de vulcanização ou inibidores de vulcanização, além do composto base elastomérico. Estes produtos químicos podem ser chamados também de subsistema elastomérico de um sistema elastomérico (formula da borracha) (Figura 3) (CAETANO, 2023).

Figura 3 – Sistema Elastomérico



Fonte: (CAETANO, 2023)

A matriz polimérica é composta pela base elastomérica que pode ser a borracha natural, borracha sintética etc.; o reforço são as cargas; os auxiliares de processo são os plastificantes e agentes de homogeneização; aditivos diversos são produtos a fim de melhorar as propriedades da borracha; proteção são agentes de proteção contra ataques do oxigênio, ozônio e outros; e a vulcanização são os aceleradores de vulcanização e agentes de vulcanização (CAETANO, 2023).

São inúmeras as matrizes elastoméricas. Dependendo da aplicação e utilização de um produto que irá ser produzido em borracha, é utilizado uma matriz elastomérica específica ou a mistura de duas ou mais matrizes elastoméricas. A matriz elastomérica NR (Borracha Natural) é a mais elástica das matrizes elastoméricas, chegando a atingir seu alongamento em 900%. Tem como característica a flexibilidade e resiliência. A matriz elastomérica SBR (Elastômero de Estireno-Butadieno) é uma borracha sintética parecida com a NR, porém menos elástica. Ela é compatível com a maioria dos elastômeros e é uma das borrachas mais utilizadas no mundo, pois é com ela que é fabricada a maior parte dos pneus do mercado. A matriz elastomérica BR (Elastômero de Polibutadieno) é o elastômero mais resiliente e sua mistura com outras matrizes elastoméricas a tornam muito boa a abrasão. A matriz elastomérica EPDM (Elastômero de Etileno-Propileno) é o elastômero com a maior capacidade de incorporar cargas. Para cada matriz elastomérica existe uma condição onde suas características são mais adequadas (Figura 4) (GRISON, BECKER, SATORI, 2010).

Figura 4 – Propriedades e Desempenho Relativo dos Tipos de Borrachas Utilizados

Nomenclatura ISO >	Borrachas não resistentes aos óleos						Borrachas resistentes a óleos						Borrachas especiais			
	NR	IR	SBR	BR	IIR	EPDM	CR	NBR	ECO CO	AU/EU	CSM	ACM	EAM	MPVQ	FMVQ	FPM
Dureza, Shore A	30-100	30-90	40-100	40-90	30-90	35-100	30-90	30-100	35-80	45 - >100	40-90	40-90	45-90	25-85	40-80	60-100
TR máxima MPa	28	21	21	21	14	24	28	28	17,5	35	17	14	14	11	10	12
AR máximo, %	700	700	500	500	800	500	800	600	600	700	500	650	650	800	600	350
Densidade	0,91	0,91	0,92	0,92	0,91	0,86	1,23	0,98	1,27	1,20	1,20	1,10	1,10	1,10	1,38	1,82
DRC	B a E.	B	B	B	M-B	B-E	B	B	M-B	B-E	B	B	B	E	E	M
Resistência eléctrica	E	E	E	E	E	E	MF-B	MF-M	MF-M	E	MF-B	M	B-E	E	B-E	M
Resistência à chama	MF	MF	MF	MF	MF-M	MF	B-E	MF-M	B	MF	B	MF	MF	B-E	E	E
Impermeabilidade a gases	B	B	M	B	E	B	B	B-E	B-E	B	E	B	E	MF	MF	B
Resistência ao impacto	E	E	E	E	E	B	B	B	B	E	B	MF	M	B	M	M
Resistência à abrasão	E	B	E	E	B	B	B	E	M-B	E	B	M	MF	MF	MF	M
Resistência ao rasgo	E	B	M-B	E	B	M	B	B	B	E	B	M	MF	M	M	MF-M
Temp. máxima, °C (C)	80	80	80	80	95	120	110	95	120	100	120	120	135	200	175	230
Temp. máxima, °C (I)	100	100	110	100	120	160	150	150	175	120	150	175	175	260	230	315
Temperatura Tg, °C	-50	-50	-50	-73	-50	-68	-46	-48	-43	-46	-51	-23	-51	-84	-68	-29
Resistência à intempérie	M-B	M-B	M	M	E	E	E	B	B	E	E	E	E	E	E	E
Resistência à oxidação	B	B	M	E	E	B-E	M-B	M-B	B	E	E	E	E	E	E	E
Resistência ao ozono	MF	MF	MF	MF	E	E	B	MF-B	E	E	E	E	E	E	E	E
Resistência vapor a 149 °C	MF	MF	MF	MF	B	E	MF	MF	MF	MF	MF	MF	B	B	B	M-B

Fonte: (CAETANO, 2023)

2.3 Análise Estrutural (MEF – Método dos Elementos Finitos)

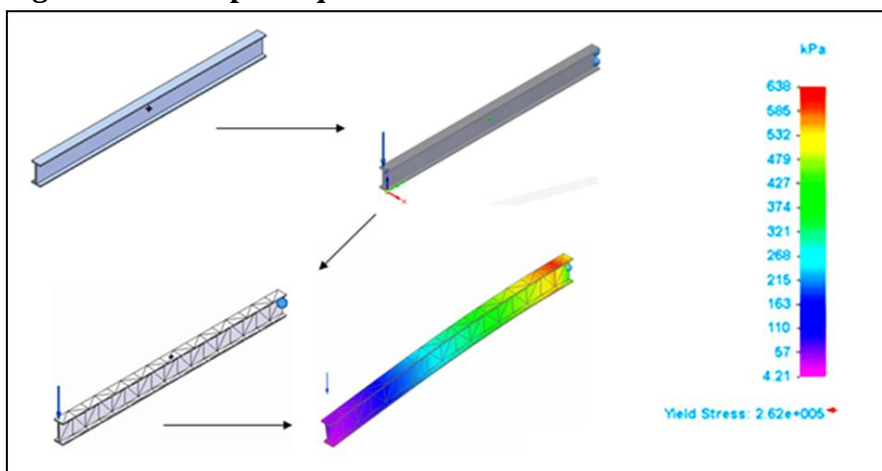
“A Tecnologia CAE permite o aumento da competitividade por intermédio da fabricação de produtos, nos quais o conceito de engenharia preditiva está presente. Elementos Finitos é uma poderosa ferramenta que suporta o desenvolvimento de produtos, evitando-se falhas tão comuns por tentativas e erros.” (ALVES Filho, 2013, p. 277).

Como uma das principais análises realizadas na tecnologia CAE (*Computer Aided Engineering*), o método dos Elementos finitos (MEF) depende diretamente da simplicidade

em que o problema é tratado, tendo como ponto inicial a geometria da peça, a discretização da geometria, as condições de contorno e os tipos de análise que serão realizadas. Um dos tipos de análise do MEF é a Análise Dinâmica ou Estática, onde as ações sobre a estrutura são consideradas os efeitos dinâmicos como inércia e aceleração. Na maioria dos casos os efeitos dinâmicos são aplicados de uma forma muito lenta, sendo considerado um estudo na forma estática. Outro tipo de análise do MEF é a Análise Não Linear ou Linear, onde é considerado que as ações exteriores provocadas por forças são muito pequenas comparando com os componentes da estrutura, admitindo que sua geometria de estrutura não se deforma durante a aplicação da força, considerando assim análise linear. Caso não sejam considerados estas hipóteses, a análise é considerada não linear (AZEVEDO, 2003).

A análise estática do MEF determina deslocamentos, tensões, deformações e forças. Análises do tipo estática calculam os efeitos gerados pelo carregamento estático na estrutura, ignorando efeitos de inércia e amortecimento causadas por cargas que variam em função do tempo. As análises podem ou não incluir cargas de inércia estática como aceleração gravitacional ou velocidade rotacional. Os tipos de carregamentos aplicados em análise estática são principalmente as forças e pressões aplicadas externamente a estrutura. Para realização da análise pelo MEF deve ser definida a geometria a ser analisada, o tipo de análise a ser realizada, a malha da geometria, propriedades do material e condições de contorno. E como resultado se obtém as tensões, fluxo de calor, convergência, fatores de segurança, etc... (Figura 5) (AZEVEDO, 2015).

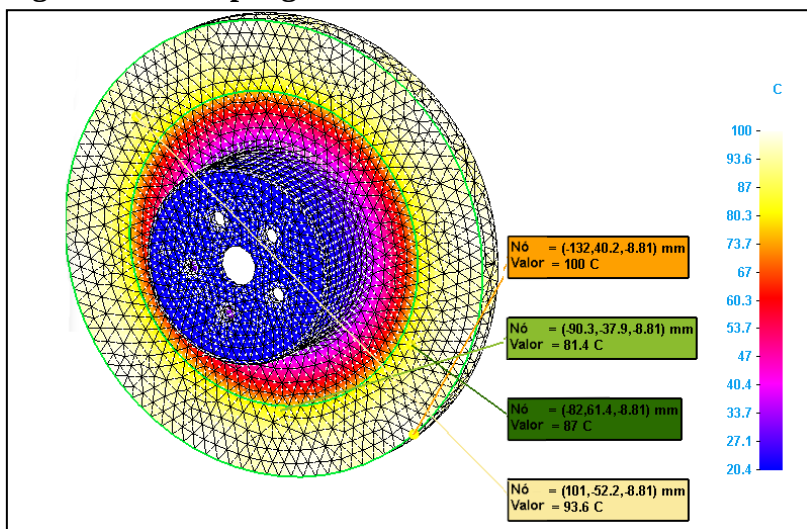
Figura 5 – Exemplo sequência do estudo de MEF



Fonte: (SIEMENS, 2023)

Softwares específicos para análise do MEF são capazes de prever como uma determinada geometria reage diante das forças do mundo real, como vibrações, calor, vazão de fluidos e outros efeitos. Estes *softwares* dedicados ou não para análise do MEF, auxiliam em projetos de peças complexas e são capazes de identificar se uma peça terá algum tipo de falha, além de mostrar de forma visual os pontos de maior fragilidade na peça, ou seja, locais onde se concentram as maiores tensões no modelo. Para realização desta análise, o *software* divide a geometria a ser analisada em um grande número de elementos, podendo chegar à centena de milhares de elementos, os chamados elementos finitos, calculando elemento por elemento (Figura 6) (AUTODESK, 2023).

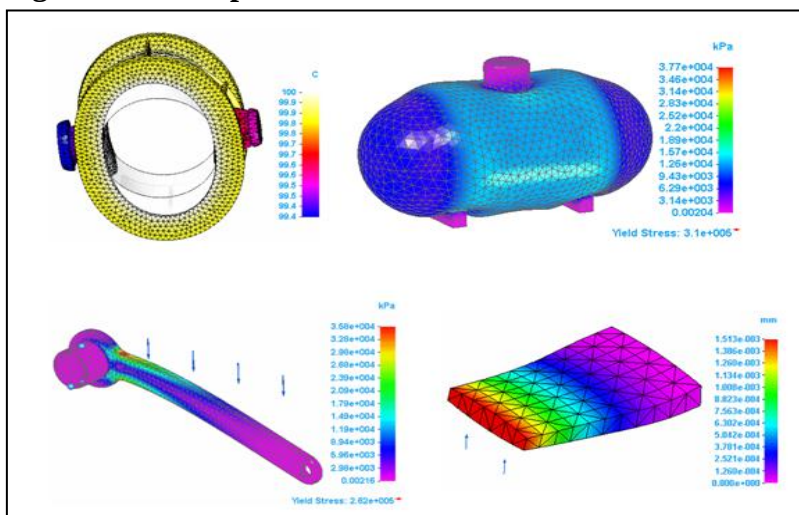
Figura 6 – Exemplo geometria dividida em elementos e nós



Fonte: (SIEMENS, 2023)

Os *softwares* para análise do MEF utilizam algoritmos matemáticos para efetuar os cálculos. Através destes cálculos o *software* decompõe a geometria em elementos primitivos como triângulos e quadrados. Assim, a qualidade dos resultados gerados nestas análises está diretamente ligada aos algoritmos matemáticos utilizados. Quanto mais próximo o resultado fica da condição real, melhor será a qualidade da análise. Os resultados das análises são expressos em forma gráfica multicolorido, facilitando a leitura dos resultados sobre a geometria (Figura 7) (SOUZA E ULBRICH, 2009).

Figura 7 – Exemplo resultados de MEF



Fonte: (SIEMENS, 2023)

3. METODOLOGIA

3.1 Preparação da Geometria

As lombadas de borracha são vendidas em módulos e, como padrão de mercado, a venda mínima deste tipo de produto é o conjunto formado por dois módulos centrais e dois

módulos laterais de acabamento (Figura 8), formando assim 1 metro de lombada, podendo ser incorporados novos módulos centrais conforme a necessidade de aplicação.

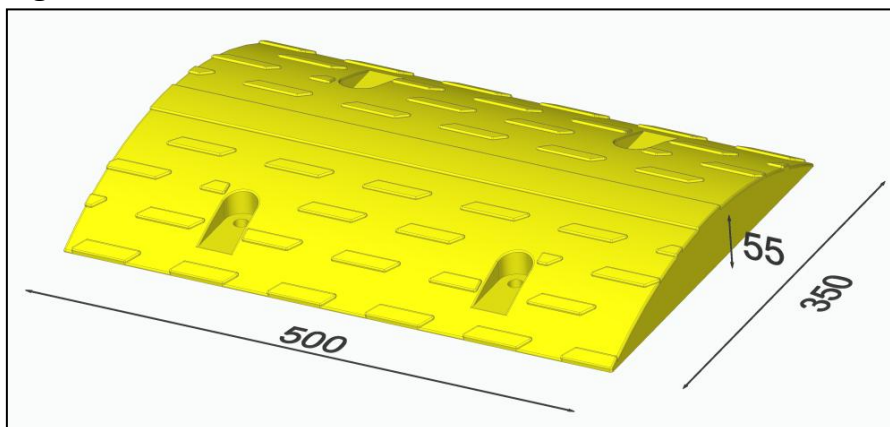
Figura 8 – Exemplo de 1 Metro de Lombada



Fonte: (Os autores, 2023)

Os módulos laterais possuem apenas a função estética, sem necessidade de suportar carga, e os módulos centrais são responsáveis por receber toda a carga exigida na aplicação do produto. Atualmente são encontrados diversos tipos de lombadas de borracha no mercado (módulo central), e todos seguem um padrão de medidas que corresponde a 500 mm de comprimento, 350 a 400 mm de largura e 50 a 75 mm de altura. A geometria utilizada para análise de redução de massa contemplou as seguintes dimensões: 500 mm de comprimento, 350 mm de largura e altura da base a sua extremidade mais alta de 55 mm (Figura 9).

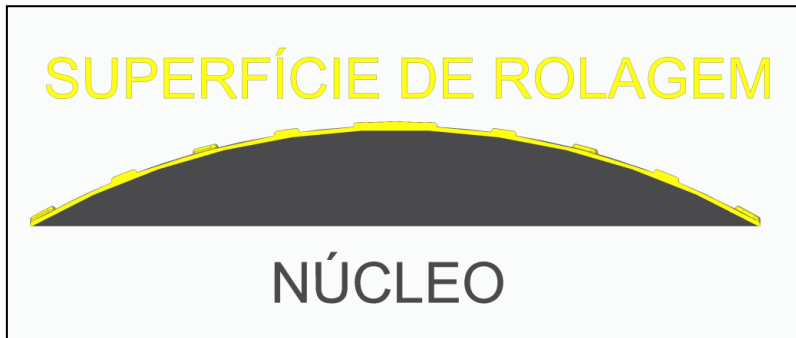
Figura 9 – Geometria da Análise



Fonte: (Os autores, 2023)

As lombadas de borracha são constituídas pelo núcleo, que corresponde a maior concentração de massa do produto e pela superfície de rolagem, que possui a função de gerar atrito entre a lombada e os pneus dos veículos. Esta superfície possui designs variados dependendo de cada fabricante e possui espessura de 3 a 5 mm sobre o núcleo (Figura 10).

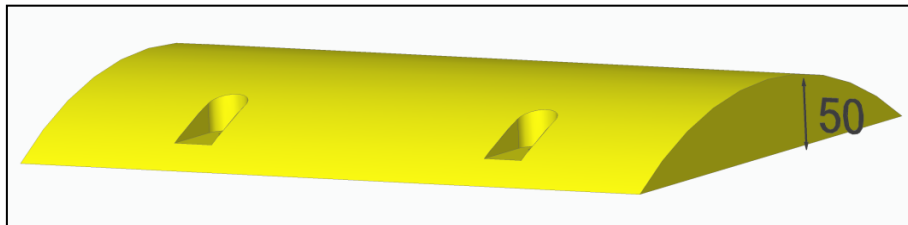
Figura 10 – Constituição da Lombada



Fonte: (Os autores, 2023)

Para análise da geometria foi desconsiderado a altura da superfície de rolagem, sendo considerado apenas o núcleo, pois o acréscimo de furos possíveis ficará abaixo da superfície de rolagem. Sendo assim, a altura total da geometria analisada foi de 50 mm (Figura 11).

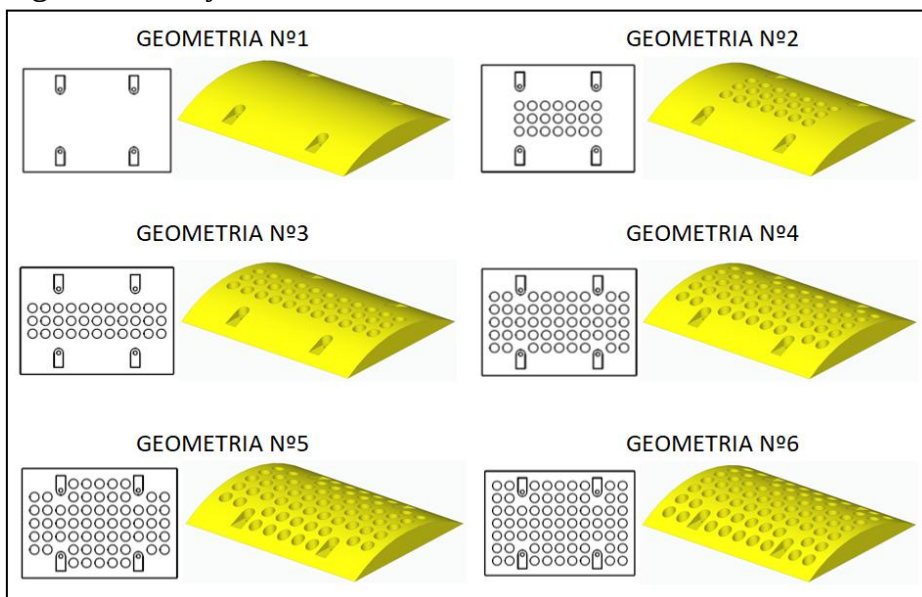
Figura 11 – Altura da Geometria para Analisada



Fonte: (Os autores, 2023)

Foram utilizadas 6 geometrias para análise de MEF, todas com dimensões de 500,0 x 350,0 x 50,0 mm, sendo acrescentados furos passantes com diâmetros de 30,0 mm (Figura 12 e Tabela 1).

Figura 12 – Layout das Geometrias Analisadas



Fonte: (Os autores, 2023)

Tabela 1 – Geometria x Quantidade de Furos

Geometria	Quantidade de furos
Nº1	0
Nº2	21
Nº3	33
Nº4	51
Nº5	61
Nº6	69

Fonte: Os autores, 2023

3.2 Caracterização do Material

A composição do sistema elastomérico (formulação da borracha) do qual são fabricadas as lombadas de borracha, é rico em reforço (também chamado de cargas), pois o objetivo desta formulação é garantir o menor preço possível, e uma grande parte destas cargas são materiais regenerados, tais como pneus triturados, sobras de outras formulações de borracha e até mesmo outros tipos de materiais triturados, como tecidos e pó de aço. O uso de cargas na formulação de borracha em comparação a uma formulação com material “virgem” é consideravelmente menor.

A utilização de uma proporção maior de carga, principalmente materiais regenerados, acarreta em uma formulação com características “menos nobre”, comparado com formulações com menores quantidades de carga. As características deste tipo de formulação são: aumento da densidade devido ao peso específico dos materiais utilizados como carga, leve aumento da resistência a compressão, diminuição do seu alongamento e, principalmente, a tensão de ruptura acaba se tornando menor.

A formulação utilizada para a análise de MEF da geometria, possui a base elastomérica SBR. Também pode ser utilizada a base elastomérica NBR, através de resíduos de outros produtos que são transformados em cargas. As bases elastoméricas SBR e NBR são muito parecidas, com propriedades muito próximas (Tabela 2) e possuem uma boa compatibilidade entre si.

Tabela 2 – Propriedades SBR x NBR

(continua)

Propriedades	SBR	NBR
Densidade g/cm ³	0,97 – 0,99	0,96 – 1,01
Dureza Shore A	30 – 95	20 – 100
Tensão de ruptura, MPa	7 – 21	7 – 21
Alongamento %	600	600
Resiliência	Boa	Boa
Resistência a rasgo	Excelente	Boa
Resistência a impacto	Excelente	Boa
Deformação residual (%)	10 – 30	10 – 20
Resistência a abrasão	Excelente	Excelente
Temperatura mínima de serviço (°C)	-45	-30
Temperatura máxima de serviço (°C)	85	130
Resistência ao ozônio	Moderada	Moderada
Resistência a intempéries	Boa	Moderada
Resistência a água	Boa	Moderada

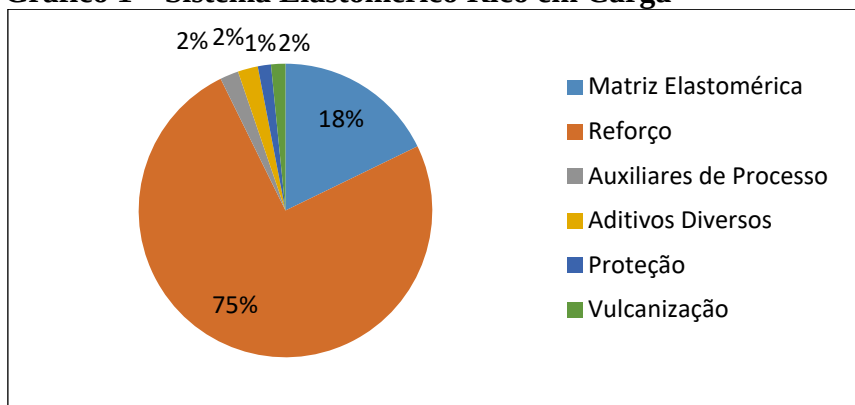
Tabela 2 – Propriedades SBR x NBR

		(conclusão)
Resistência a ácidos e bases diluídas	Boa	Boa
Resistência a solventes alifáticos	Muito Fraca	Boa
Resistência a solventes aromáticos	Muito Fraca	Moderada a boa
Resistência a óleos e gasolinas	Muito Fraca	Excelente
Vida média	3 a 5 anos	3 a 10 anos

Fonte: (CAETANO, 2023)

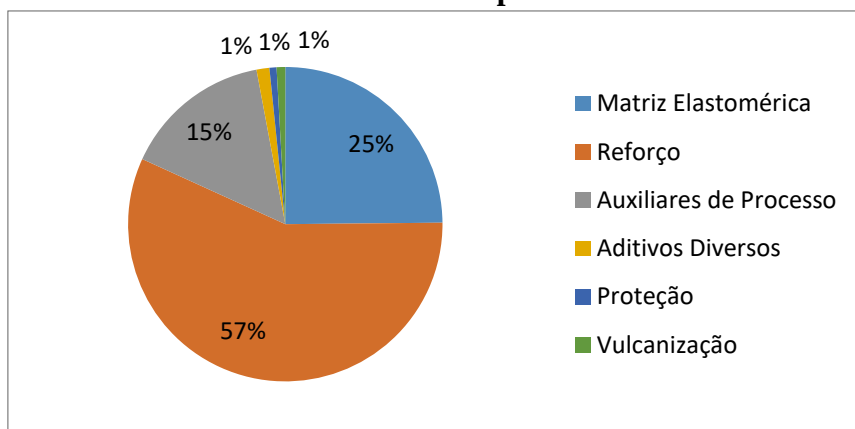
A formulação utilizada para a análise de MEF possui dados aproximados de 18% de base elastomérica, 75% de cargas e 7% de outros componentes químicos como: auxiliares de processo, aditivos, proteção e vulcanização. Em geral, formulações típicas de borracha utilizam 25% de base elastomérica, 57% de cargas e 18% de outros componentes químicos (Gráfico 1 e Gráfico 2) baseados em CARIBOR,2023 e CAETANO, 2023 respectivamente.

Gráfico 1 – Sistema Elastomérico Rico em Carga



Fonte: Os autores, 2023

Gráfico 2 – Sistema Elastomérico Típico



Fonte: Os autores, 2023

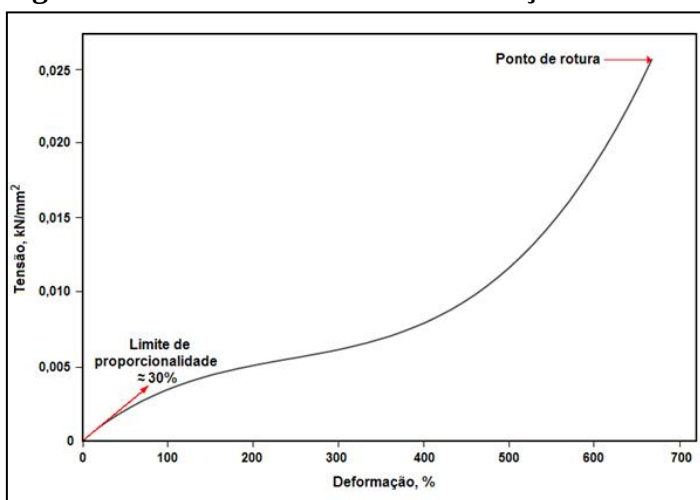
Para realização da análise de MEF através do *software* foi necessário alimentar o mesmo com as seguintes informações: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de deformação, tensão máxima e percentual de alongamento. Para o cálculo de massa da geometria também foi necessário alimentar o *software* com o valor da densidade do composto de borracha.

Devido a alta quantidade de carga presente na formulação da borracha utilizada para fabricação das lombadas, esta formulação apresenta um percentual de alongamento relativamente baixo, comparando com formulações típicas. Para a formulação do estudo em específico foi considerado o alongamento de 200%. Com isso, o módulo de elasticidade utilizado foi de 5,0 MPa.

O coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,47, valor este mediano considerando o coeficiente para outros tipos de borracha, como a Ebonite (0,39 a 0,43) e as borrachas termoplásticas (0,45 a 0,50).

A borracha como um material elastomérico não possui uma proporcionalidade entre tensões e deformações (Figura 13). Sua tensão de ruptura está diretamente ligada a seu alongamento e, como o alongamento utilizado foi de 200% e considerando que é uma formulação com baixo teor elastomérico, foi utilizado o valor corrente para borrachas EPDM que fica em torno de 7,0 MPa para a tensão de deformação, sendo também sua tensão máxima.

Figura 13– Gráfico Tensão x Deformação da Borracha



Fonte: (CAETANO, 2023)

Agrupando as informações, os dados que foram necessários para alimentar o *software* ficaram da seguinte forma a partir dos dados de CAETANO,2023 (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades da Borracha para o *software*

Propriedades	Valores
Densidade	1400 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	5,0 MPa
Coeficiente de Poisson	0,47
Tensão de Deformação	7,0 MPa
Tensão Máxima	7,0 Mpa
Alongamento %	200

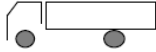
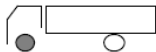
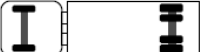
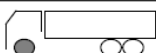
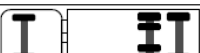
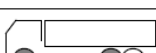
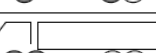
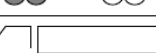
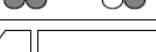
Fonte: Os autores, 2023

3.3 Condições de Contorno e Análise do MEF

Conforme portaria nº63 de 31/03/2009 do DENATRAN, que homologa os limites de comprimento e peso bruto total e combinado para veículos de carga e passageiro, os veículos comumente utilizados em pátios de transportadoras se enquadram na classificação I3 do

anexo 1 desta resolução (Figura 14), onde o carregamento máximo por eixo é de 23 Toneladas.

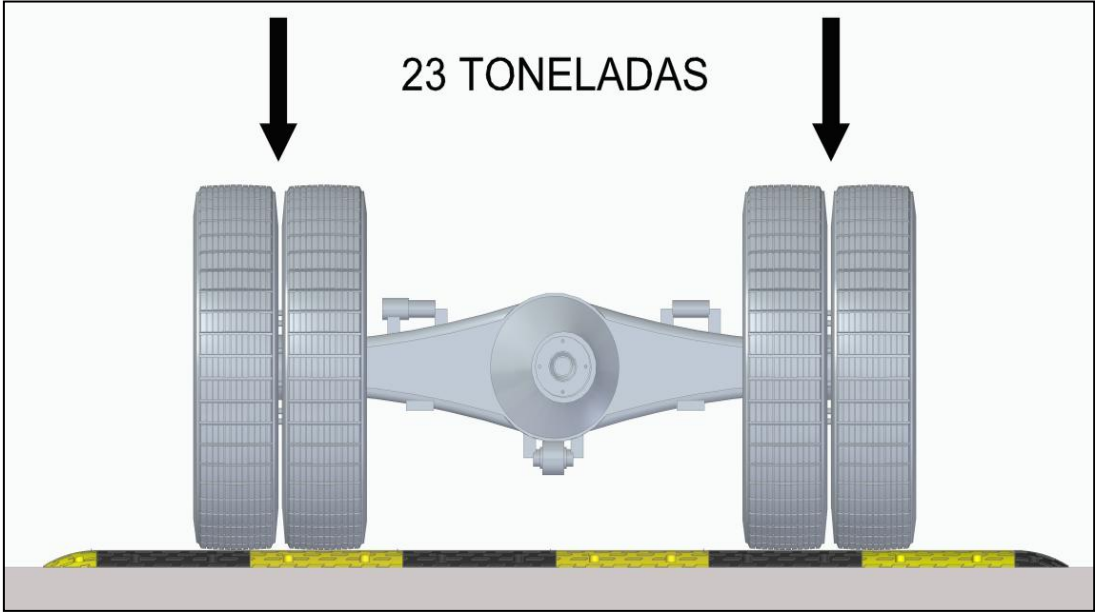
Figura 14 – Limites de Peso por Eixo

Caminhão			Peso máximo por eixo ou conjunto de eixos (t)
I-1			6 + 6 = 12
I-2			6 + 10 = 16
I-3			6 + 17 = 23
I-4			6 + 13,5 = 19,5
I-5			6 + 13,5 = 19,5
I-6			12 + 17 = 29
I-7			12 + 13,5 = 25,5
I-8			12 + 13,5 = 25,5

Fonte: (DENATRAN, 2009)

Ao passar sobre o conjunto de lombadas este carregamento é distribuído por dois ou mais módulos centrais (Figura 15). Para realização da análise de MEF foi considerado o peso máximo de 23 toneladas sobre dois módulos centrais. Desta forma, cada módulo central esta sujeito ao carregamento de 11,5 toneladas (Figura 16).

Figura 15– Carregamento por Eixo



Fonte: Os autores, 2023

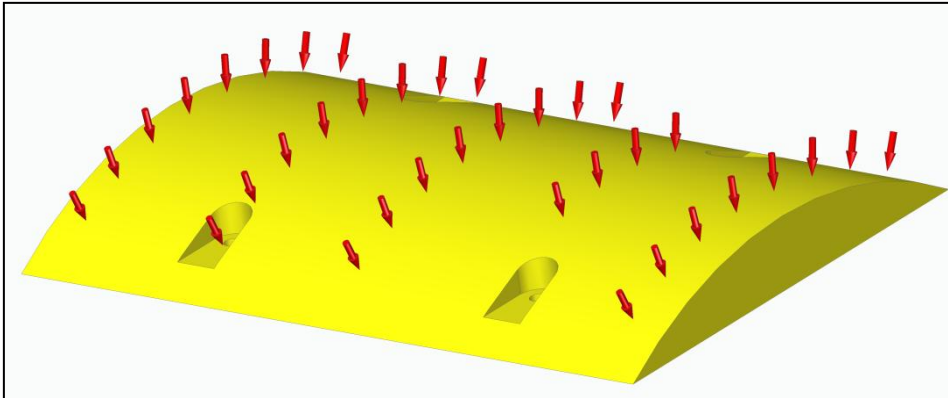
Figura 16 – Carregamento no Módulo Central



Fonte: Os autores, 2023

O carregamento de 11,5 toneladas foi transformado para 115kN para imputar no *software*. Este carregamento foi aplicado ao modelo geométrico na forma radial (Figura 17), simulando a movimentação do pneu do veículo sobre a superfície da lombada, porém na forma estática e tendo como região de maior concentração de carga a cota de 50 mm, região superior mais alta da geometria.

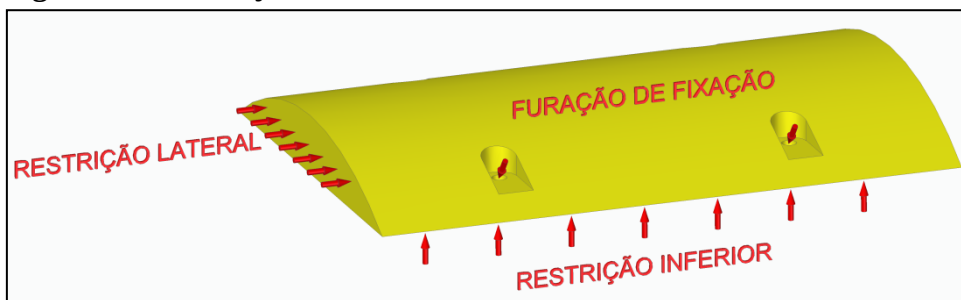
Figura 17 – Carregamento Radial na Geometria



Fonte: Os autores, 2023

As lombadas são aplicadas sobre pavimento asfáltico ou concretado e fixadas através dos furos de fixação para parafuso M12. Desta forma, para realização do MEF as restrições dos graus de liberdade do modelo foram as furações de fixação, a base inferior que fica em contato com o pavimento e as laterais onde ficam em contato com outros módulos centrais (Figura 18).

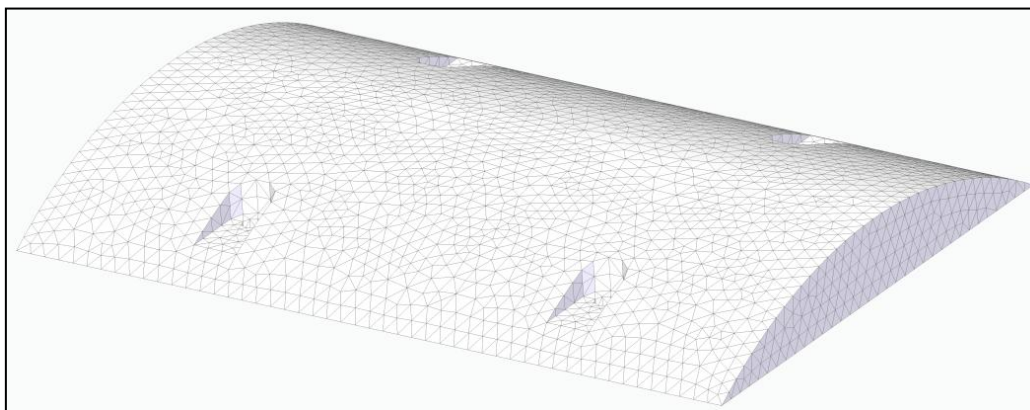
Figura 18 – Restrições dos Graus de Liberdade da Geometria



Fonte: Os autores, 2023

Aplicando as propriedades do material, o carregamento estabelecido e as restrições dos graus de liberdade, foi gerada a malha na geometria. Quanto mais fina é a malha mais preciso serão os cálculos, porém o número de equações e tempo de processamento também serão maiores. Para a geometria em análise, foi utilizado uma malha do tipo tetraédrica de tamanho mediano (em proporção a geometria) de 10 mm (Figura 19), e o tipo de estudo será o estático linear.

Figura 19 – Malha Gerada na Geometria



Fonte: Os autores, 2023

A análise do MEF foi realizada no *software* Solid Edge® do fabricante SIEMENS, na sua versão gratuita para estudantes (*Solid Edge® Student Edition*), que consegue realizar a simulação estrutural de forma simples e objetiva. Porém, não é possível um refino de geometria de malha ou qualquer outro recurso mais avançado na análise por elementos finitos. Mesmo assim, consegue atender as expectativas de verificação dos resultados da geometria a ser submetida a análise de MEF. Os resultados, como em qualquer outro *software* de análise por elementos finitos, se deram expressos sobre a geometria através de cores, correspondendo as regiões com a maior e a menor tensão ou deformação. Para todas as geometrias a análise ocorreu com os mesmos parâmetros e procedimentos a fim de garantir a análise correta do MEF.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

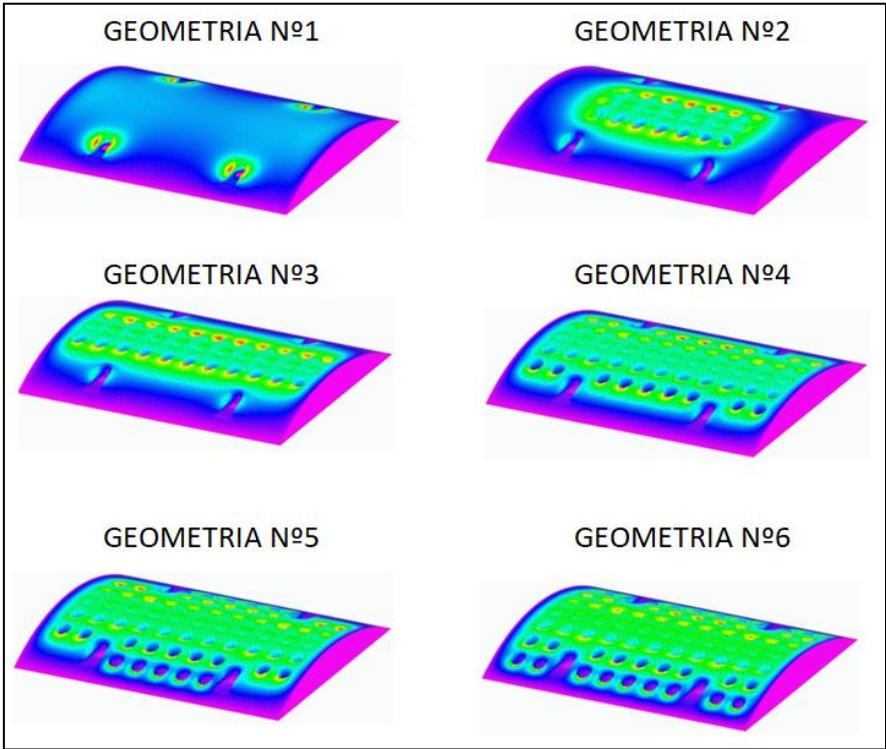
4.1 Resultado do Acréscimo de Furos

O parâmetro de maior importância para verificação dos resultados obtidos a partir da inclusão de furos na geometria e, conseqüentemente, a redução de massa, é a deformação após

a aplicação da força de 11,5 Toneladas ou 115 kN. Esta deformação representa o quanto a geometria se deformou com relação a altura inicial de 50,0 mm. Para condição de geometria aprovada ou reprovada, será adotado a deformação máxima de 10,0% com relação a geometria inicial. Desta forma, a deformação máxima permitida para a geometria com a quantidade de furos máxima deve ficar abaixo de 5,0 mm.

Os resultados obtidos a partir das análises do MEF através do *software* das 6 geometrias podem ser verificados através da figura e tabela a seguir (Figura 20 e Tabela 4).

Figura 20 – Resultados Gráficos das Geometrias Analisadas



Fonte: Os autores, 2023

Tabela 4 – Resultados de Massa e Deformação

Geometria	Quantidade de furos	Massa (kg)	Deformação (mm)
Nº1	0	8,04	1,06 – 1,33
Nº2	21	7,04	3,04 – 3,64
Nº3	33	6,5	3,21 – 3,85
Nº4	51	5,78	3,63 – 4,36
Nº5	61	5,54	4,29 – 5,01
Nº6	69	5,35	4,93 – 5,64

Fonte: Os autores, 2023

Ao incluir furos passantes de Ø 30,0 mm na geometria maciça do produto, observa-se uma redução de massa em todas as geometrias analisadas porem a geometria nº6 é a que mais possui furos, tendo a maior redução de massa comparando com a geometria maciça (geometria nº1). A redução de massa gerada pelo acréscimo de 69 furos foi de 2,69kg, porém sua deformação ficou entre 4,93 a 5,64 mm, deformação essa maior que a estipulada como máxima admissível para aprovação da geometria. Assim, a geometria que atende o máximo de furos possíveis atendendo a deformação máxima estipulada foi a nº5, onde sua deformação ficou entre 4,29 a 5,01 mm. Com a geometria nº5 a redução máxima de massa ficou em 2,5kg.

O que significa que para cada peça a ser produzida poderá ser diminuído a quantidade de formulação de borracha em 2,5kg.

As geometrias nº2, 3 e 4 obtiveram redução de massa de 1,0kg, 1,54kg e 2,26kg, e deformações de 3,04 a 6,64mm, 3,21 a 3,85mm e 3,63 a 4,36mm, respectivamente. Com os resultados obtidos todas as geometrias atendem a necessidade de suportar a carga exigida durante a aplicação do produto, assim como cada geometria apresenta sua redução de massa.

A redução de massa apresentado na geometria nº5 representa 31% da massa total do produto, e essa redução gera um impacto direto nos custos de fabricação da mesma, assim como impactos no descarte destes produtos após sua utilização.

4.2 Impacto Econômico da Redução de Massa no Módulo Central da Lombada de Borracha

O valor mínimo estimado do kg de matéria prima (formulação de borracha) utilizada para a produção deste tipo de peça fica em torno de R\$ 6,00, conforme informações aproximadas da empresa CARIBOR Tecnologia em elastômeros, empresa esta que produz este tipo de peças.

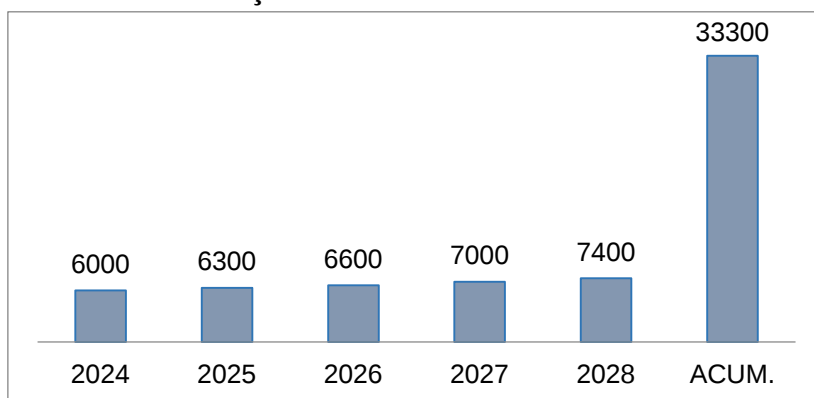
Para a produção do módulo central conforme a geometria nº1 (produto maciço) é necessário 8,04kg de formulação de borracha, não considerando as perdas com rebarbas e excesso de borracha no molde. Da mesma forma, para a produção do produto conforme geometria nº 5 seria necessário 5,54kg. O custo para produzir o módulo central em borracha com a geometria maciça fica em R\$48,24 e produzindo o módulo central em borracha conforme geometria nº5, fica em R\$33,24.

Esses 2,5kg a menos na geometria da peça representa uma redução de R\$15,00 apenas no custo de fabricação, relacionado com a formulação de borracha, não sendo considerados outros aspectos ligados a massa do produto como tempo de vulcanização e logística de transporte (capacidade de carga dos veículos).

Redução esta representativa em um mercado competitivo, já que pode ser repassada ao cliente na forma integral ou transformado em melhorias no processo de fabricação, podendo gerar otimização no processo produtivo obtendo ganhos dentro do mesmo.

Conforme informações aproximadas da empresa CARIBOR, a estimativa de produção deste tipo de produto é de 6000 peças por ano, com perspectiva de crescimento de 5% ao ano na produção deste tipo de produto, podendo chegar a produção de 7400 peças ao ano em 2028 e um acumulado de 33300 peças produzidas durante o período de cinco anos (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Produção anual estimada



Fonte: Os autores, 2023

Com a produção anual estimada, o custo apenas com a formulação de borracha, não considerando reajuste de preços nas matérias primas no decorrer dos próximos anos, pode

chegar ao acumulado neste período um total de R\$1.606.392,00 para a peça maciça e R\$1.106.892,00 para a peça conforme geometria nº5.

Pode-se afirmar que no final do período de cinco anos a economia para a empresa com relação a formulação de borracha fica em R\$499.500,00, com uma média de R\$99.900,00 ao ano.

4.3 Impacto Ambiental da Redução de Massa no Módulo Central da Lombada de Borracha

As lombadas de borracha são dispositivos que estão em constante utilização, e é o tipo de equipamento que requer a manutenção através da substituição dos componentes desgastados ou danificados por componentes novos.

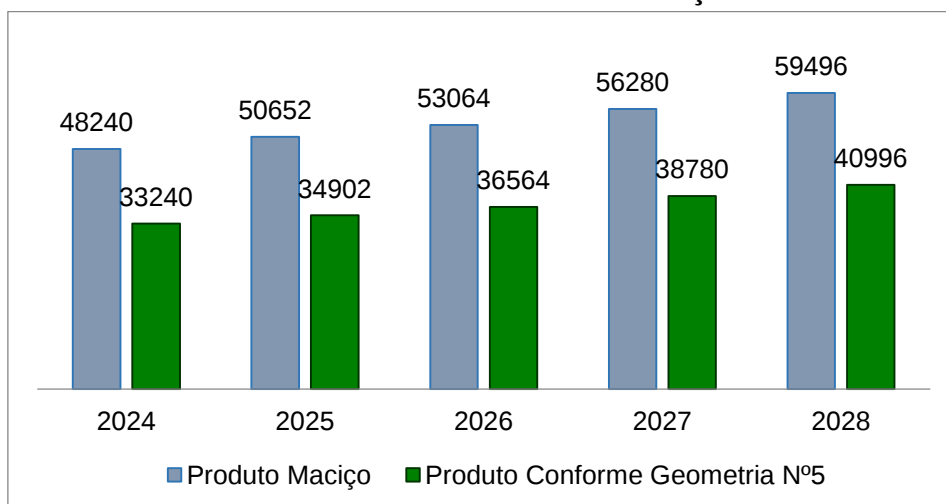
Tendo em vista a perspectiva de produção para os próximos cinco anos, este mesmo volume de peças poderá ser usado na substituição de peças já instaladas, o que acarretará no descarte das peças substituídas. Este descarte se faz através da destinação para aterros específicos, pois se trata de um material prejudicial a natureza, além de ser constituído por produtos não renováveis.

Muitos estudos já foram realizados para a reciclagem e reaproveitamento deste tipo de material que são as borrachas vulcanizadas, porém os custos para o reaproveitamento da borracha em outros tipos de produtos como pavimentação asfáltica ou até mesmo reprocessados para utilização em outros produtos é elevado, devido aos equipamentos e energia necessários para transformar os mesmos.

Com isso, a redução de massa nos módulos centrais da lombada de borracha é uma forma de contribuir beneficemente com o meio ambiente, diminuindo a quantidade de material que será descartado com a substituição dos componentes das lombadas danificadas durante a sua manutenção.

Com a estimativa de produção de peças no período de cinco anos, é possível verificar da mesma maneira a quantidade de material em kg que seria utilizado para produzir o módulo central maciço e a quantidade de material para produzir o módulo central conforme geometria nº5 (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Consumo Anual Estimado de Formulação de Borracha



Fonte: Os autores, 2023

No fim do período de cinco anos a quantidade total de redução pode chegar a 83.250kg, uma média de 16.650kg por ano que deixarão de ser descartados em aterros.

CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho era encontrar uma maneira de ser mais competitivo no mercado de lombadas de borracha, reduzindo custos e também contribuindo com o meio ambiente, já que seria reduzido a quantidade de borracha na confecção. A maneira encontrada foi de colocar furos na geometria original da lombada, reduzindo a massa, que encadeia na redução de preço e de material descartado.

Com os estudos realizados e com a análise de elementos finitos, conseguiu-se reduzir uma lombada de borracha que continha 8,04 kg de massa originalmente, para uma geometria com 5,54 kg de massa que deforma até no máximo 10% de sua geometria original com a mesma força aplicada, onde esse era um dos pré-requisitos para ser uma lombada aprovada para confecção.

Dessa forma, a geometria com 61 furos foi escolhida como a melhor opção, já que reduz massa e, consequentemente, custo de fabricação em torno de 30%. Com a análise de mercado feita nos próximos cinco anos, com essa nova geometria de lombada de borracha seria possível reduzir um custo total de aproximadamente R\$ 500.000,00. Essa significativa redução de custo, viabilizaria uma melhor comercialização comparado a outras lombadas presentes no mercado.

E, por ser um produto que está em constante uso, é necessária uma manutenção que é feita através da troca dos componentes danificados, e esse material é descartado em aterros específicos. Com um breve estudo, foi possível analisar que aproximadamente 16 toneladas ao ano deixariam de ser descartadas com a nova geometria, trazendo um impacto positivo ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus, por nos ter permitido passar por todos os obstáculos encontrados ao longo do curso e ter nos dado saúde e determinação para superá-los.

Aos nossos pais por todo apoio, com incentivos nos momentos difíceis e paciência ao longo desses anos de estudo.

A professora orientadora Dra. Daniele da Silva Domingos, pelos ensinamentos e auxílio prestados durante a confecção do presente trabalho.

A empresa Caribor, que contribuiu com dados que ajudaram na realização deste trabalho.

Aos nossos amigos e colegas de curso, com quem convivemos por um bom tempo durante os últimos anos, pela troca de aprendizados que permitiram nos fazer evoluir.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, neste trabalho e durante todos os anos de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTODESK, **Finite Element Analysis**. Disponível em:

<https://www.autodesk.com.br/solutions/finite-element-analysis>. Acesso em: 08 Abril. 2023.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos. 1º Edição**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 258 paginas, Abril 2003. (disponível em Alvaro Ferreira Marques Azevedo - Alvaro Azevedo Home Page)

AZEVEDO, Domingos Flavio de Oliveira. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**, 136 paginas, 2015.

BRASIL. Conselho Nacional de Transito. (CONTRAN). **Dispositivos Auxiliares** / CONTRAN - DENATRAN. 1a edição – Brasília: CONTRAN, 2021. 280p.

BRASIL. Conselho Nacional de Transito. (CONTRAN). **Resolução nº63 de 31 de Março de 2009** / CONTRAN - DENATRAN. Brasília: CONTRAN, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/portarias/2009/portaria_denatran_63_09.pdf

CAETANO, Mario J.L. **Borracha de Estireno Butadieno (SBR)**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borrachas-sinteticas/borracha-de-estireno-butadieno-sbr/>. Acesso em: 08 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Coeficiente de Poisson**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/coeficiente-de-poisson/>. Acesso em: 27 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Descrição Geral da Borracha Natural**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borracha-natural/descricao-geral-da-borracha-natural/>. Acesso em: 08 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Formulação dos Compostos de Borracha**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/formulacao/>. Acesso em: 08 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Matérias Primas para o Fabrico da Borracha**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/formulacao/formulacao-principios-basicos/materias-primas-para-o-fabrico-da-borracha/>. Acesso em: 27 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Módulos**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/modulos/>. Acesso em: 27 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Princípios Básicos de Formulação**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/formulacao/formulacao-principios-basicos/>. Acesso em: 27 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Propriedades Mecânicas**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/>. Acesso em: 27 Abril. 2023.

CAETANO, Mario J.L. **Tensão de Rotura e Alongamento na Rotura**: Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/tensao-e-alongamento-na-rotura/>. Acesso em: 27 Abril. 2023.

FILHO, Avelino Alves. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6º Edição. São Paulo: Érica, 2013.

GENT, Dr. Alan N. **Engineering with Rubber – How to Design Rubber Components**. Carl Hanser Verlag, Munich 2012.

GRISON, Élyo Caetano, BECKER, Emilton Juarez, SATORI, André Francisco. **Borrachas e seus Aditivos: Componentes, Influências e Segredos**. Porto Alegre: Letra e Vida, 2010.

JR., William D C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 04 abr. 2023.

SIEMENS, **Simulation**. Disponível em: Simulação | Software de Simulação | Solid Edge (siemens.com). Acesso em: 17 Maio. 2023.

SOUZA, Adriano Fagali de, ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia Integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e aplicação**. São Paulo: Artliber Editora, 2009.