

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DIEGO BUNIATTI

**ANÁLISE DE AÇOS PARA AUMENTO DE CAPACIDADE MECÂNICA E
REDUÇÃO DE PESO DE NERVURAS DE SAPATA DE FREIO.**

**CAXIAS DO SUL
2014**

DIEGO BUNIATTI

**ANÁLISE DE AÇOS PARA AUMENTO DE CAPACIDADE MECÂNICA E
REDUÇÃO DE PESO DE NERVURAS DE SAPATA DE FREIO.**

Trabalho para conclusão de curso de graduação, apresentado na disciplina de Estágio II MEC0258A ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Supervisora: Prof^ª. MSc. Fernanda Bordin

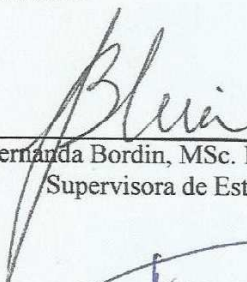
**CAXIAS DO SUL
2014**

DIEGO BUNIATTI

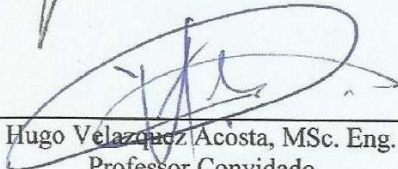
**ANÁLISE DE AÇOS PARA AUMENTO DE CAPACIDADE MECÂNICA E
REDUÇÃO DE PESO DE NERVURAS DE SAPATA DE FREIO.**

Trabalho para conclusão de curso de graduação, apresentado na disciplina de Estágio II MEC0258A ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

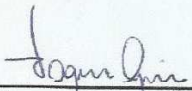
Banca Examinadora



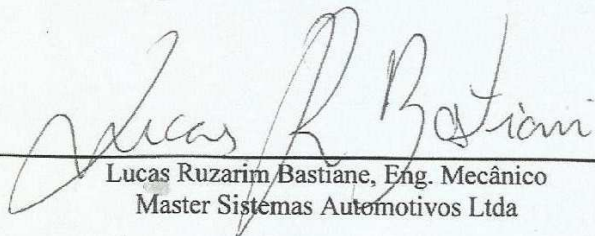
Prof. Fernanda Bordin, MSc. Eng. Metalúrgica
Supervisora de Estágio



Prof. Victor Hugo Velazquez Acosta, MSc. Eng. Metalúrgica
Professor Convidado



Prof. Vagner Grison, MSc. Eng. Mecânica
Professor Convidado



Lucas Ruzarim Bastiane, Eng. Mecânico
Master Sistemas Automotivos Ltda

RESUMO

O intuito deste trabalho foi desenvolver o conhecimento técnico científico para redefinir o projeto de componente da sapata de freio para veículos pesados. Propondo redução de peso, foi realizada uma análise crítica do componente no material atualmente indicado SAE 1030 modificado, respeitando as propriedades mecânicas requeridas para o componente de tensão escoamento de 310MPa a 414MPa. Uma pesquisa científica foi elaborada para buscar as opções disponíveis para mudança de material, geometria e processo de fabricação requerido, atendendo os requisitos da norma SPEC B-106-2, 2005 e SPEC 459-C, 2000, que se referem as propriedades do material e tempera em região especificada em projeto, respectivamente. Esta análise gerou um novo projeto que, antes de liberado para fabricação de protótipo para validação, foi simulado matematicamente através de análise por método de elementos finitos observando-se os quesitos de produtividade estipulados pela engenharia de processos. Os resultados foram satisfatórios, pois foi possível encontrar aços compatíveis para a substituição que possibilitaram a redução do peso da peça e a elevação de sua resistência mecânica.

Palavras Chave: Sapata. Projeto. Método de Elementos Finitos (MEF). Peso.

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop the scientific expertise to redefine the design component of brake shoe for trucks. Proposing weight reduction, a critical analysis of the component in the material currently indicated modified SAE 1030 was held respecting the mechanical properties required for the yield strength 310MPa to 414MPa . A scientific study was designed to find the options available for changing material, geometry and required manufacturing process, meeting the requirements of the standard SPEC B -106- 2, 2005 and SPEC 459- C 2000 relate the material properties and hardness in project specified area, respectively. This analysis generated a new design before released to manufacturing prototype for validation, was simulated mathematically through analysis by finite element method by observing the requisites stipulated by the productivity process engineering. Results were satisfactory as it was possible to find compatible replacement that allowed reducing the weight of the part and the elevation of his strength steels.

Keywords: Shoe. Design. Finite Element Method (FEM). Weight.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Primária Secundária, (b) Duas Primárias e (c) Duo-Servo.....	15
Figura 2 – Demonstração dos sentidos de força aplicados na sapata de freio.....	16
Figura 3 – (a) Sapata pra veículo pesado, (b) Sapata para veículo leve e (c) Sapata fundida para veículo pesado	16
Figura 4 – Componentes da sapata de freio.....	17
Figura 5 – Nervura de Sapata de Freio	18
Figura 6 – Fluxograma de Processo	19
Figura 7 – Patim de freio	20
Figura 8 – Distribuição das Forças no Freio.....	23
Figura 9 – Simulação por MEF de patim de freio	25
Figura 10 – Malha em Modelo para MEF	26
Figura 11 – Fluxograma de Trabalho	28
Figura 12 – Soldadura Projeção Máquina RWC	30
Figura 13 – Projeto de Nervura de Sapata de Freio.....	33
Figura 14 – Malha dos Elementos para MEF do Patim de 15”	34
Figura 15 – Aplicação das Restrições de Movimento Tambor e Roletes.....	35
Figura 16 – Aplicação das Restrições de Movimento Patim.....	36
Figura 17 – Aplicação das Forças nas Sapatas	36
Figura 18 – Ensaio de Tração	39
Figura 19 – Amostras preparadas de nervura de freio SAE 1030 modificado.....	39
Figura 20 – MEF Modelo Atual de Sapata com 8mm.....	41
Figura 21 – Patim com Ruptura no Corpo Analisado no Campo de Provas	42
Figura 22 – Patim com Ruptura no Came Analisado no Campo de Provas.....	42
Figura 23 – MEF Modelo Atual de Sapata com 6,35mm.....	43
Figura 24 – MEF Modelo Atual de Sapata com 5,0mm.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química SAE 1030 modificado.....	29
Tabela 2 – Composição Química dos Materiais Substitutos Selecionados.....	37
Tabela 3 – Materiais Selecionados na Pesquisa, Propriedades Mecânicas	37
Tabela 4 – Norma e Resultado da Análise Química por Espectrometria	40
Tabela 5 – Resultado do Ensaio de Tração, Dureza e Informações Comparativas	40
Tabela 6 – Resultados das Análises por MEF dos Materiais Propostos.....	46
Tabela 7 – Diferença de Custos Entre SAE 1030 modificado e Outros Materiais.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

F_a	Força aplicada
F_d	Força de saída tangencial
A	Ampere
$^{\circ}F$	Temperatura em Fahrenheit
HR	Dureza Rockwell
VC	Dureza Vickers
Kgf	Quilograma Força
TO	Torque Output
P_{max}	Pressão Máxima
ε	Deformação Normal
σ	Tensão Normal
N.m	Newton Metro
Pa	Pascal

SUMÁRIO

RESUMO.....	3
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVO	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
1.3 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E AMBIENTE DE ESTÁGIO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 FREIOS	14
2.2 SAPATAS DE FREIO	15
2.2.2 Descrição dos Componentes da Sapata de Freio Estampada.....	17
2.2.3 Processo de Manufatura de Sapatas de Freio.....	19
2.3 ENSAIOS NORMALIZADOS - ANÁLISE DE MATERIAL.....	22
2.4 FORÇAS ATUANTES EM UM FREIO TIPO S CAME.....	22
2.5 MÉTODO DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	24
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	27
3.1 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO	27
3.2 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO	27
3.3 SITUAÇÃO ATUAL	28
3.3.1 Material SAE 1030 Modificado.....	28
3.3.2 Processo de Manufatura	30
3.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS	31
3.5 MODELO PARA MEF	32
3.5.1 Alteração do Projeto Atual.....	32
3.5.2 Preparação do Modelo	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 MATERIAIS SELECIONADOS NA PESQUISA.....	37

4.2	CARACTERIZAÇÃO DA NERVURA DE SAPATA SAE 1030 MODIFICADO	.38
4.3	MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO DO PATIM ATUAL.....	41
4.4	MODELAMENTO MATEMÁTICO DO COMPONENTE NOS AÇOS PROPOSTOS	44
4.5	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS POR MEF E CUSTO DOS AÇOS PROPOSTOS	47
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico acelerado, mais empresas surgiram e conseqüentemente, mais competitivo o mercado se tornou. Diversos países começaram a incentivar a pesquisa e desenvolvimento para ganhar mais espaço e crescimento econômico.

As empresas começaram a buscar novas formas de tecnologia, modificando e melhorando seus projetos.

Pode-se citar a redução de peso nos projetos de componentes automotores, como um dos mais estudados a fim de, reduzir seus custos operacionais e conseqüentemente os impactos gerados na utilização dos recursos naturais.

O mercado de veículos automotores Brasileiro começa a receber uma demanda crescente de montadoras, cujo principal interesse é: aproveitar o crescimento do mercado e expandir seus negócios.

Focando em aumentar o desempenho destes veículos, este trabalho vem com a proposta de reduzir o peso do componente sapata de freio para veículos pesados, mais especificamente na nervura da sapata, através do desenvolvimento de matéria prima alternativa para manufatura da mesma e avaliação através de elementos finitos.

A nervura é o componente estrutural da sapata de freio, ela faz a ancoragem da sapata de freio no restante do sistema e é responsável por transmitir a força aplicada no sistema de freio para o tambor de frenagem. Recebe principalmente as cargas térmicas e mecânicas que resultam da energia aplicada durante a frenagem do veículo, conforme Limpert (1999).

Segundo Limpert (1999), para que um veículo automotor opere de forma segura, é necessário dirigir o veículo com manutenção da velocidade e adaptando-o às condições em trânsito. O sistema de freios, os pneus e o sistema de direção, são os componentes de segurança mais críticos de um veículo.

O freio é um componente de segurança que vem sendo utilizado desde a fabricação das carroças e charretes, e foi aprimorado ao longo dos anos. Desde 1900 os freios a tambor mecânico foram introduzidos nos primeiros carros da época, o novo sistema envolvia uma única banda de aço inoxidável flexível enrolada em um tambor no eixo traseiro. (BERNHART, 2013).

Conforme foi aumentando a velocidade e a capacidade de carregamento dos veículos ao longo dos anos, mais ciência foi sendo empregada para desenvolver novas tecnologias de

sistemas de frenagem, buscando aumentar a eficiência mecânica de atuação dos dispositivos de freio e diminuir as distâncias de frenagem, proporcionando maior segurança no transporte.

1.1 JUSTIFICATIVA

Promover o aperfeiçoamento tecnológico e a redução de massa do componente nervura do patim de freio em 20% pelo menos, buscando assim melhor desempenho de rodagem e aumento de capacidade de carga de veículos pesados devido diminuição do peso da peça, ao qual, o componente é aplicado e reduzir os custos de manufatura do componente.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Otimizar o projeto da nervura de sapata de freio de veículos pesados, substituindo o material atual SAE 1030 modificado e minimizando sua espessura a fim de reduzir seu peso, mantendo as propriedades mecânicas específicas para o componente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar os conceitos dos projetos segundo as normas internas específicas das empresas fabricantes, a fim de atuar na sua modificação.
- b) Analisar outros aços que possuam propriedades mecânicas, os quais permitam os mesmos esforços com espessuras menores.
- c) Realizar ensaios de laboratório para validar as propriedades mecânicas e composição químicas do material atual a fim de substituí-lo por outro.
- d) Adquirir conhecimento em softwares de análise de elementos finitos e assim modelar o componente com os aços propostos com diferentes espessuras, avaliando os esforços submetidos ao componente com o propósito de validar a prototipagem do novo projeto.
- e) Avaliar os custos de fabricação da nervura de sapata com os novos materiais e confrontar com o custo do material SAE 1030 modificado, para validar financeiramente o projeto.

1.3 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Master Sistemas Automotivos Ltda., localizada na Rua Atílio Andreazza nº 3520 no Bairro Interlagos em Caxias do Sul - RS, fundada em 1986 como uma joint-venture entre Randon, a qual detém 51% do capital social, e a Rockwell, renomeada Meritor. A Master é líder no segmento de freios pneumáticos para veículos pesados. Atualmente, as linhas de produtos fabricados são: freio pneumático do tipo “S” came, freio pneumático do tipo “Z” came, freio pneumático a disco, freio hidráulico a disco (quadraulic), ajustadores automáticos (ASA), ajustadores manuais (MSA) e câmaras de freios ou atuadores.

A empresa também está crescendo no segmento de válvulas e sistemas anti-bloqueio de frenagem ou *Anti-Lock Brake System (ABS)*, produtos complementares e que de acordo com a nova legislação Brasileira, serão de obrigatoriedade em todos os veículos a partir do ano de 2014. Os principais clientes são: MAN, Ford, Iveco, Mercedes, Agrale, Randon Implementos, Hino, Guerra e DAF.

A engenharia de processos, área de atuação deste trabalho de estágio, é responsável pelo desenvolvimento de novos processos, melhoramento dos processos já existentes, auxílio ao desenvolvimento de produto (verificando adequações de projeto que facilitem e minimizem impactos no processamento). Também apóia a área de qualidade e de fabricação em qualquer falha no processamento e na resolução de problemas. A área de engenharia de processos possui um coordenador responsável por uma equipe de analistas e um gerente que é compartilhado pelas áreas de qualidade e fabricação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FREIOS

A classificação dos diversos modelos de freios para veículos é separada em duas famílias, dispositivos de freio a tambor e dispositivos de freio a disco. Para o desenvolvimento deste trabalho trataremos exclusivamente de freios a tambor, com uma pequena introdução sobre freios a disco e sistemas anti-bloqueio.

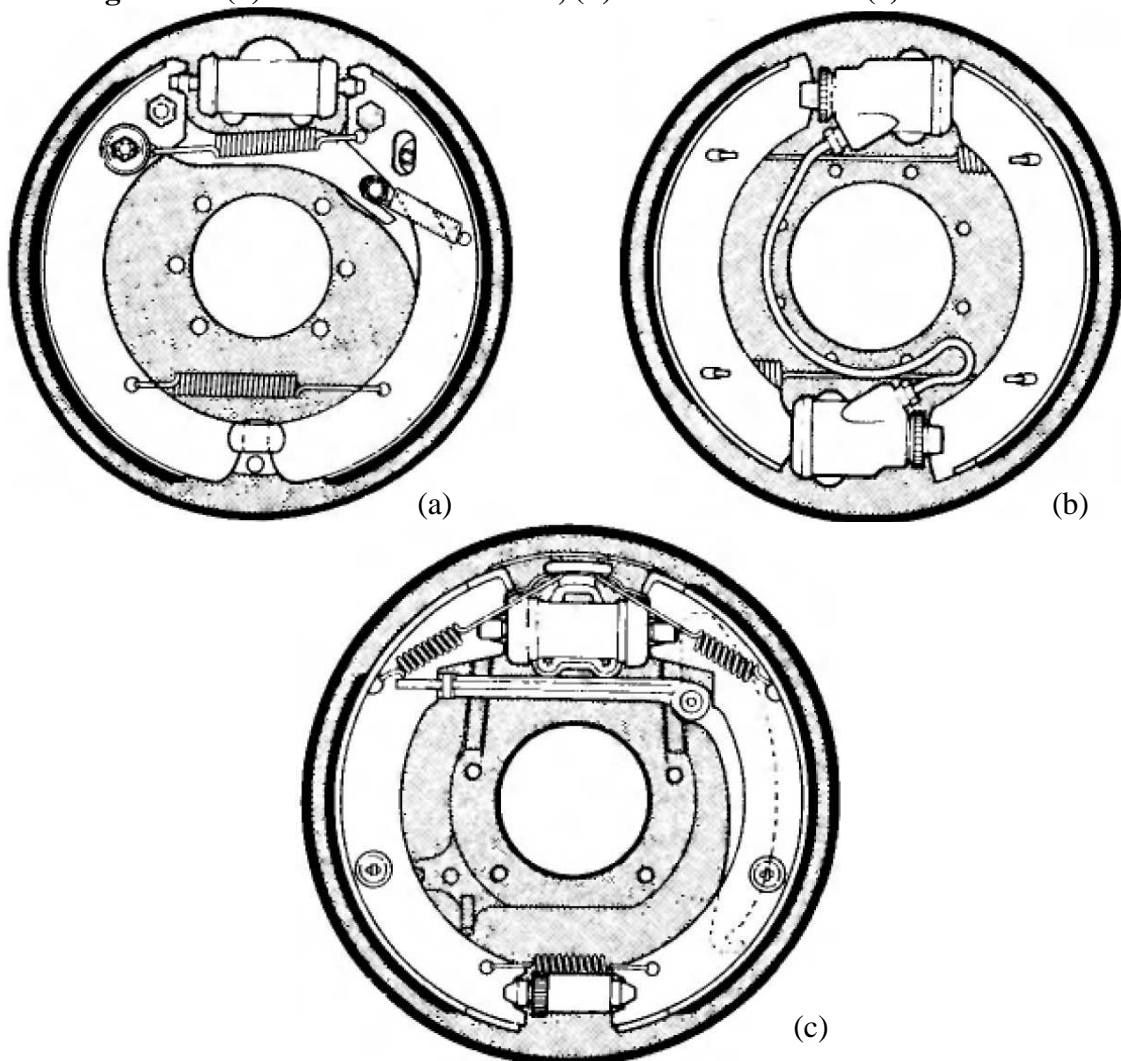
Para ambas as famílias de sistema de frenagem, foi expedida a Resolução nº380, do Conselho Nacional de Trânsito, que estabelece que todos os veículos fabricados a partir do ano de 2014 devem sair de fábrica contendo o sistema ABS (*Anti-lock Braking System*), frenagem antitravamento. Este sistema é composto por uma unidade eletrônica que controla sensores de velocidade instalados nas rodas e o próprio sistema pneumático ou hidráulico do freio, não permitindo o travamento total das rodas durante frenagem do veículo (CONTRAN, 2011).

Os freios a disco foram patenteados por Lanchester em 1902 e são formados basicamente por cilindros, pastilhas e disco acionados pneumaticamente ou hidraulicamente. Este sistema permite frenagens mais curtas e rápidas, possuindo um sistema operacional mais complexo e caro em relação ao freio a tambor (DAY e SHILON, 2007).

Os freios a tambor, têm seu funcionamento baseado no conjunto sapatas e tambor de freio. As sapatas de freio têm seu funcionamento acionado pneumaticamente ou hidraulicamente, este sistema pode ser classificado em externo com cinta ou interno com sapata. O sistema de freio interno com sapata se subdivide em primária/secundária ou secundária/primária, duas sapatas primárias ou duas sapatas secundárias e *duo-servo brake*. Estes três modelos de freio utilizam sapatas de freio, que podem ser vistas na figura 1 (LIMPERT, 1999).

A figura 1 mostra os três modelos de freios a tambor citados. Pode-se ver as sapatas de freio montadas junto ao sistema de freio, (a) Primária Secundária ou Secundária Primária, um ponto de ancoragem para as sapatas, na parte inferior do freio e na parte superior um pistão hidráulico de acionamento, que pode ser substituído por um eixo excêntrico onde o sistema é pneumático; (b) Duas Primárias ou Duas Secundárias, neste modelo percebe-se dois pistões de acionamento simultâneo para avanço total das sapatas de freio; (c) Duo-Servo Brake, neste sistema apenas a sapata secundária fica ancorada a sapata primária empurra o secundária quando acionada (LIMPERT, 1999).

Figura 1 – (a) Primária Secundária, (b) Duas Primárias e (c) Duo-Servo



Fonte: Adaptado de LIMPERT (1999)

2.2 SAPATAS DE FREIO

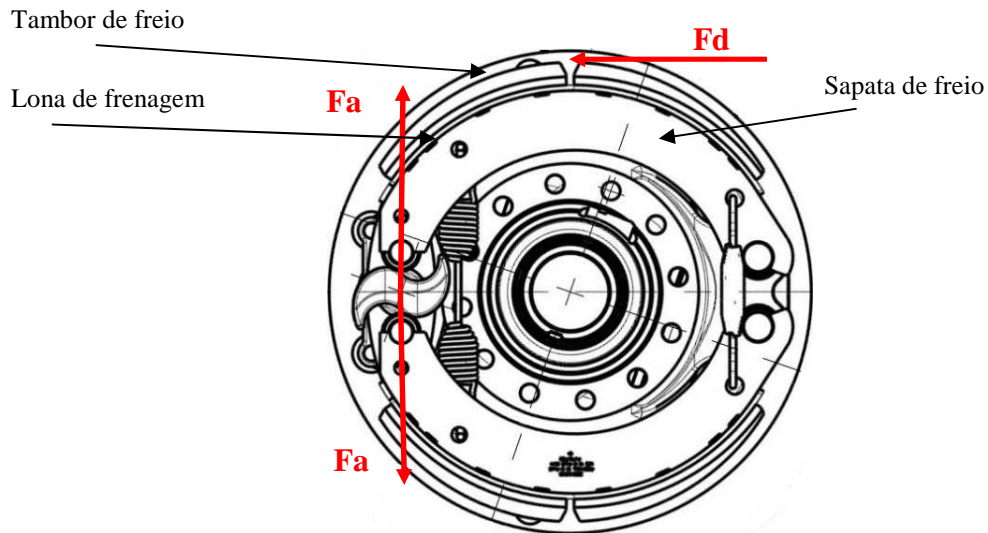
2.2.1 Descrição das Sapatas de Freio

Para Limpert (1999), as sapatas de freio são os componentes que fundamentam a atuação dos freios a tambor, a atuação delas pode ser acionada por três modos distintos, o primeiro por eixo excêntrico, o segundo por atuação de cilindro hidráulico e o terceiro por atuador tipo cunha. Nas três formas de atuação uma força (F_a) é aplicada, gerando o contato entre tambor e sapatas de freio, força (F_d). A figura 2 mostra onde e em que sentido as forças F_a e F_d são aplicadas no freio.

As sapatas de freio são compostas por: nervura “*web*”, a cobertura “*table*”, lona de frenagem (material de atrito) e os rebites de fixação (DAY e SHILON, 2007).

As sapatas de freio também são conhecidas como patins de freio. O patim de freio tem variações dimensionais de projeto conforme a aplicação e necessidade da montadora, podendo variar seu raio externo de acordo com o diâmetro do tambor de frenagem e largura total de contato com o tambor.

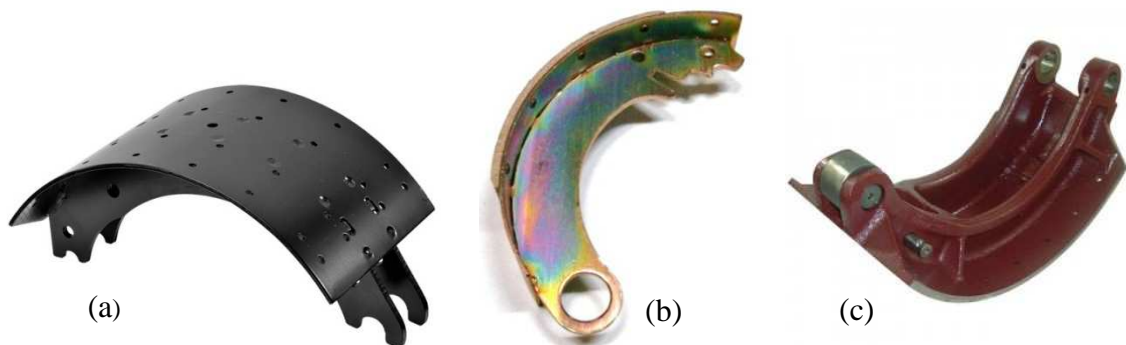
Figura 2 – Demonstração dos sentidos de força aplicados na sapata de freio



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2013.

A Figura 3 exemplifica alguns modelos de sapatas de freio fabricadas e comercializadas na América Latina, (a) Sapata de freio a tambor estampada para veículos pesados; (b) Sapata para freio a tambor estampada para veículos leves; (c) Sapata de freio a tambor fundida para veículos leves.

Figura 3 – (a) Sapata pra veículo pesado, (b) Sapata para veículo leve e (c) Sapata fundida para veículo pesado

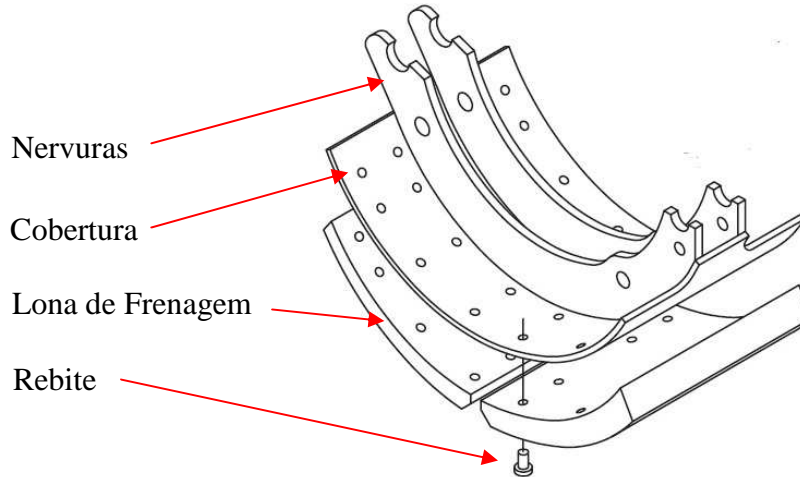


Fonte: Disponível em: <http://www.duroline.com.br/>; <http://www.jipebras.com.br/>; <http://www.iabv.com.br/>;

2.2.2 Descrição dos Componentes da Sapata de Freio Estampada

As sapatas de freio são formadas por quatro componentes: cobertura, nervura, lona de freio e rebites. A figura 4 apresenta os componentes necessários de uma sapata de freio, conforme citados e apontados.

Figura 4 – Componentes da sapata de freio



Fonte: Disponível em: <https://www.master.com>.

2.2.2.1 Cobertura

Trata-se do componente que se sobrepõe as nervuras de freio. Esta peça é fabricada de aço comum e dimensionais diversos, conforme as especificações de projeto para cada aplicação. É manufaturada por estampagem, onde são feitos: os furos para fixação das lonas de frenagem, os furos de tração para encaixe da chaveta da nervura no momento da solda e as pepitas que servem como sobre material para fusão da nervura à cobertura na soldagem projeção.

Conforme Day e Shilon (2007) esta peça tem como função servir de base para a rebiteagem das lonas de frenagem, e por receber e transferir os esforços referentes do conjunto de frenagem e do contato com o tambor de freio.

2.2.2.2 Nervura

De acordo com Day e Shilon (2007), a nervura é a peça responsável por suportar as cargas transferidas entre os pontos de contato do tambor e o conjunto de freio, serve de base para a cobertura que suporta as lonas de frenagem. Cada fabricante de freio manufatura este

componente conforme necessidade do cliente ou especificação de projeto. Podendo ser feita de diversos tipos de aço e com perfis e espessuras variadas como a utilização de aços SAE1010 com doze milímetros de espessura ou SAE1030 modificado com espessuras menores.

A nervura é usualmente processada por corte mecânico em prensa e ferramental de estampagem. A figura 5 apresenta uma nervura de sapata de freio estampada. Os pontos indicados são as regiões de contato entre sapata e conjunto de freio e onde a cobertura é tracionada, conforme indicado anteriormente.

Figura 5 – Nervura de Sapata de Freio



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2013.

2.2.2.3 Rebite

Segundo Junior (2011), o rebite é um componente de fixação mecânica semi permanente que consiste em um cilindro metálico com cabeça em uma das extremidades, este atua como fixador ou união mecânica entre dois ou mais elementos através de um pré-furo que transpassa os elementos que se deseja fixar. A cabeça do rebite é apoiada por um punção de formato reto que impede o recuo do rebite, enquanto outro punção com o formato de escoamento desejado é pressionado na outra extremidade, deformando, reduzindo a altura e expandindo o corpo do rebite para que este faça a fixação dos elementos.

2.2.2.4 Lona de Frenagem

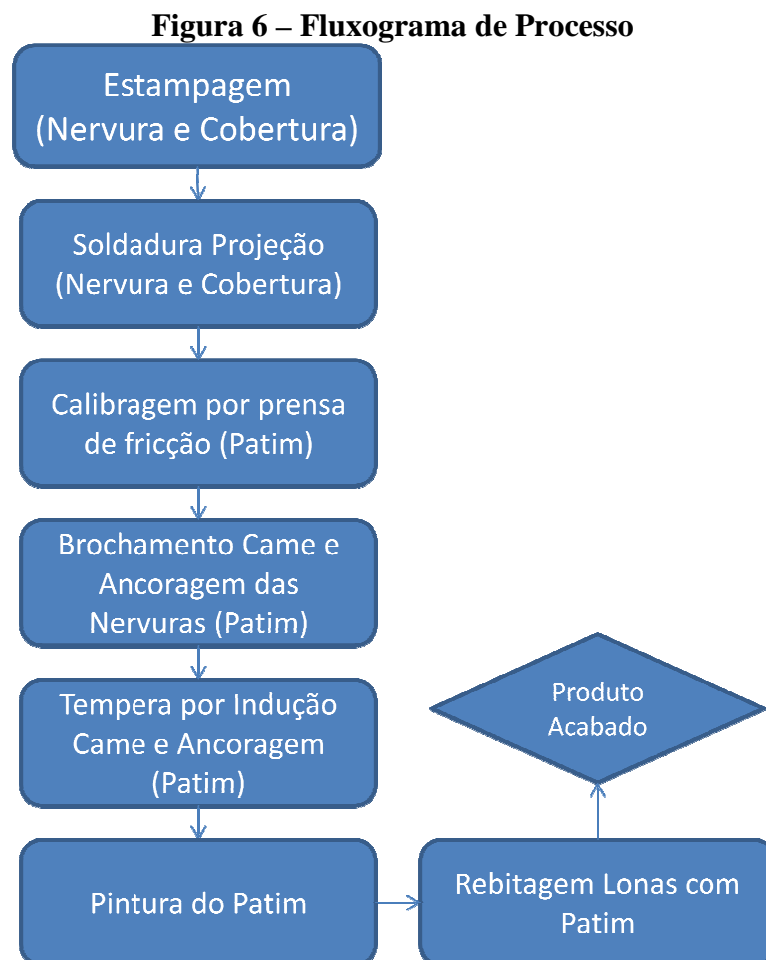
A maioria dos materiais de fricção modernos são especialmente formulados de muitos elementos para dar boa fricção e desempenho em desgaste sob as condições de contato deslizantes dos freios (DAY e SHILON, 2007, p.06).

Os materiais de fricção são componentes importantes e responsáveis pela segurança e eficiência constante dos sistemas de freios.

Materiais de fricção utilizados na indústria automotiva podem ser obtidos de semimetálicos e livres de amianto após a regulamentação deste pela norma NR 15, 2009.

2.2.3 Processo de Manufatura de Sapatas de Freio

O fluxo de processamento seguido mais comum entre os fabricantes de freio para manufatura do patim é mostrado na figura 6.



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2013.

Dos processos indicados acima, os únicos que podem sofrer influência considerável pela proposta de troca de material e consecutiva redução de peso, são os processos de soldadura por projeção e tempera por indução, pois o resultado dos processos é influenciado pela composição química do material.

Os demais processos não irão sofrer mudanças consideráveis, pois as propriedades mecânicas do material deverão permanecer próximas às propriedades já existentes.

2.2.3.1 Soldadura por projeção

Segundo Machado (1996), a soldadura por projeção é um processo de solda por resistência, onde a união dos metais é produzida pela fusão de uma região específica das superfícies dos materiais que se pretende unir.

Esta fusão se dá através do calor gerado pela resistência da junta a passagem da corrente elétrica sem adição de materiais durante a realização da solda, uma força de compressão é colocada antes, durante e depois do momento da aplicação da corrente. A localização das marcas de solda é determinada através de embosse, projeção ou pepita em uma das superfícies de fusão.

A figura 7 exemplifica o modelo de sapata estampada com soldadura projeção.

Figura 7 – Patim de freio



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2013.

Segundo ASM 6 (1993, p. 696), os materiais que apresentam maior resistência são os de mais difícil soldabilidade, pois podem causar o deslocamento do ponto de calor em geral

causando o colapso da projeção. Aços macios e de baixa liga e ligas com níquel são os materiais ideais para soldadura por projeção.

Duas ou mais soldas podem ser realizadas ao mesmo tempo com o mesmo eletrodo. Este processo é comumente aplicado em peças: forjadas, estampadas ou usinadas, em aços carbono, inoxidável e algumas ligas de níquel.

2.2.3.2 Têmpera por Indução

Segundo ASM 4 (1993, p. 466), o processo de indução por eletromagnetismo é um modo de se alcançar diferentes resultados de tratamento térmico como: endurecimento superficial, alívio de stress, normalização de material e refinamento de grão. O endurecimento superficial por indução consiste em criar uma camada na região da superfície da peça, aquecendo esta região acima da temperatura de transformação do material ao ponto de transformá-la em austenita, então, resfriando a região aquecida rapidamente para transformá-la em martensita, endurecendo-a nesta região.

Segundo Callister (2000) a martensita é uma estrutura monofásica que compete com as transformações da perlita e bainita, só estará em equilíbrio através de difusão da austenita. A transformação martensítica só ocorre quando o resfriamento da têmpera é eficiente para prevenir a difusão do carbono.

Algumas superfícies de aços comuns tratados termicamente pela indução por eletromagnetismo são aços de médio carbono como SAE 1030 e 1045, usados em peças automotivas, aços de alto teor de carbono como SAE 1070, usados para fabricar ferramentas manuais, brocas e ligas de aço, usadas em válvulas automotivas, ferramentas de usinagem e componentes (ASM 4, 1993).

Para a operação de têmpera por indução, a seleção de frequência e potência do equipamento influencia na profundidade da dureza. Profundidades entre 0,25mm e 1,5mm proporcionam uma boa resistência para carregamentos leves e moderados. Para estes modelos de endurecimento, deve-se usar entre 10 kHz a 2 MHz de frequência e potências de 800 a 8000 W/cm² e um tempo de aquecimento de poucos segundos. Para penetrações maior dureza de 1,5mm até 6,4mm e para peças que necessitam resistir a cargas maiores, a frequência utilizada cai de 10 kHz a 1 kHz, potencia de 80 a 1550 W/cm² e o tempo de aquecimento aumenta para uma exposição elevada em muitos segundos (ASM 4, 1993).

Outro fator de extrema importância no tratamento de têmpera por indução é o resfriamento da peça, o método e fluido utilizado. A forma como a peça é resfriada depende

muito de sua geometria, as duas formas mais utilizadas são de anéis de spray e imersão total da peça. O anel de spray deve ser posicionado corretamente conforme o centro do eixo da peça ou que se posicione a baixo e ou ao lado da peça, este é acionado de uma única vez sobre a região a ser resfriada após o término do processo de aquecimento (ASM 4, 1993).

Segundo Runge (1989), o fluido deve promover rápida transferência de calor entre os dois estágios de calefação e ebulição, caracterizados pela formação de camada gasosa sobre a superfície da região temperada e uma camada disforme de gás e líquido. Deve ter a menor viscosidade possível na temperatura de trabalho do sistema para facilitar a circulação e diminuir as perdas por arraste. A estabilidade térmica e o ponto de fulgor o mais elevado possível são de extrema importância para prevenir riscos na operação. Óleos de polímero solúveis em água proporcionam velocidade de resfriamento quando em concentrações até 10%.

2.3 ENSAIOS NORMALIZADOS - ANÁLISE DE MATERIAL

Segundo Souza (1982), a análise de materiais tem por objetivo extrair informações que indiquem as propriedades do material analisado como qual a composição química ou as propriedades mecânicas da amostra, além de permitir a análise de falhas de fabricação das peças em produção.

Ensaio de análise química conforme norma ASTM E-415-08 (2008), dureza Rockwell C seguindo a norma ABNT NBR NM ISO 6508-1 (2009) e ensaio de tração seguindo norma ABNT NBR 6892 (2002), são os métodos de análise laboratorial identificados para verificação das amostras de material para realizar comparação com os descritivos das normas de especificação Meritor do componente nervura de freio.

2.4 FORÇAS ATUANTES EM UM FREIO TIPO S CAME

Segundo demonstrado por Santos (2011) baseado nos autores Newcomb e Spurr (1967), para o cálculo das forças aplicadas nas sapatas de freio, é necessário alguns dados dimensionais de projeto do conjunto de freio, com estes dados calculamos as forças específicas (F_d) e (F_a) para alcançar o torque de saída do freio e então calcular a força total aplicada nas sapatas de freio.

As equações 2.1 e 2.2 são utilizadas para o cálculo do valor final do torque do freio (TO), ou Torque Output conforme (SANTOS, 2011).

$$F_d = F_a \cdot BF = \frac{IT}{2(Er)} \cdot BF = \frac{(Cs \cdot P \cdot AL)}{Er} \cdot BF \quad (2.1)$$

$$TO = F_d \cdot r_{tambor} \quad (2.2)$$

AL = Alavanca do ajustador

Cs = Área da câmara de freio [mm²]

Er = Raio efetivo do eixo "S" [mm]

Fa = Força de aplicação [N.m]

F_{cam} = Força da câmara de freio [N.m]

F_d = força de saída do tambor [N.m]

IT = Torque de entrada do eixo "S" [N.m]

P = Pressão de alimentação da câmara [Pa]

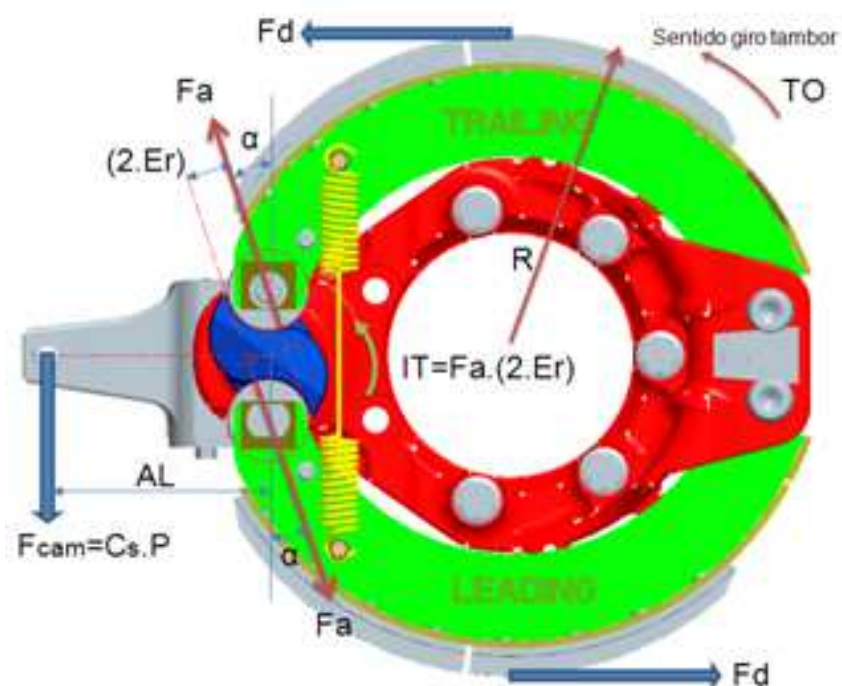
R = Raio do tambor

TO = Torque de saída [N.m]

α = Ângulo da força de aplicação

A figura 8 mostra de onde são retirados os dados para o cálculo de F_d e TO , como e onde as forças ou resultantes atuam no freio.

Figura 8 – Distribuição das Forças no Freio



Com os resultados das forças F_d e TO , calcula-se os esforços suportados pelas sapatas de freio, pressão máxima ou P_{max} , na equação (2.3).

$$P_{max} = \frac{TO}{(2 \cdot \mu \cdot W \cdot R^2) \cdot [\cos(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi + \theta)]} \quad (2.3)$$

P_{max} = Pressão máxima [Pa]

μ = Coeficiente de atrito

α = Ângulo inicial da lona de freio

φ = Ângulo do pino de ancoragem

θ = Ângulo de contato da lona

R = Raio do tambor [mm]

TO = Torque do freio [N.m]

W = Largura da sapata [mm]

Conforme Newcomb e Spurr (1967), este resultado indica os esforços suportados pelas sapatas de freio permitindo fazer as análises de resistência necessárias para o projeto das mesmas.

2.5 MÉTODO DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Segundo Azevedo (2003), o método dos elementos finitos tem como objetivo determinar as tensões e deformações de componentes com geometrias complexas, sujeitos a esforços exteriores. Estes componentes podem ser classificados quanto a sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. As análises realizadas nestas geometrias podem ser dinâmicas ou estáticas e lineares ou não lineares. A formulação do método requer a existência de uma equação integral, sobre um volume complexo (V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (V_i). Conforme equação (2.4).

$$\sum_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (2.4)$$

f = Força [kgF]

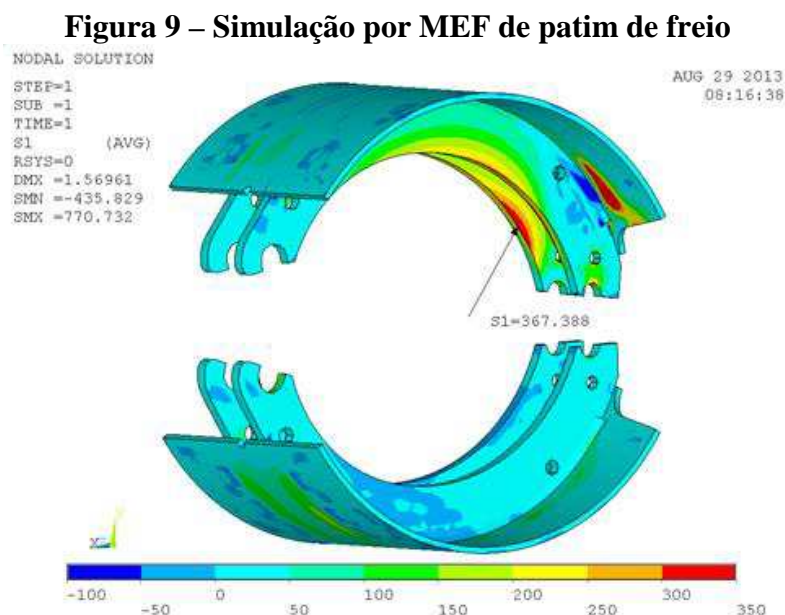
dV = Derivada do volume (inicial e final)

As análises de elementos finitos devem levar em consideração as forças de inércia e as acelerações que estão sujeitos os elementos analisados. Quando as ações aplicadas são lentas pode-se desconsiderar as forças de inércia, neste caso, denominando a análise como estática.

Ao se analisar uma estrutura sólida, podemos desconsiderar os deslocamentos gerados por elementos externos em alguns casos, pois comparados às dimensões da estrutura analisada estes deslocamentos são muito pequenos, neste caso a análise é dita não linear geometricamente. Caso a análise de tensões passe a constituir a região de deformação elástica da curva $\sigma \times \varepsilon$ (tensão normal x deformação normal) do elemento, esta análise é considerada linear geometricamente.

As estruturas podem ser classificadas quanto a sua geometria podendo ser reticuladas, laminares ou sólidas. As sólidas são todas as estruturas que não podem ser classificadas como reticulares ou laminares e possuem estrutura com geometria complexa com análises com base em tensão e deslocamento. As laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média com espessura menor do que as demais dimensões do elemento. Já as reticulares são constituídas por barras prismáticas cujas dimensões são transversais e relativamente menores do que o comprimento do eixo (ALVES FILHO, 2006).

A figura 9 mostra como o software simula os cálculos realizados e demonstra no próprio modelo da peça os resultados de tensão e deformação, indicando se suporta ou não as cargas solicitadas.



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2013.

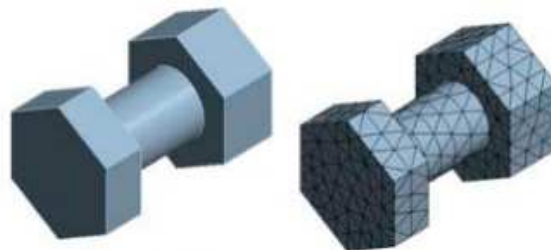
Pode-se verificar na figura 9, uma legenda onde as cores azuis representam menor tensão e as cores, amarela até vermelha, as tensões mais elevadas. Percebe-se que nas nervuras há o aumento de tensão nas regiões de ancoragem e nos raios do corpo da peça, marcadas com setas as regiões que recebem as maiores forças de trabalho.

Segundo Shigley (2011), para a realização da análise em elementos finitos se faz necessária à criação da malha da estrutura da peça. A malha é a subdivisão da estrutura, do componente a ser analisado, em elementos e nós. Com esta subdivisão cada elemento é calculado separadamente e o resultado apresentado conforme figura 9.

A figura 10 mostra em um modelo de parafuso e porca, como é a geração da malha. Refinando a malha ao aumentar o número de pontos em regiões onde as tensões são mais elevadas, o resultado da análise é mais preciso.

De acordo com Shigley (2011), para a continuidade da análise de elementos finitos é necessário estabelecer as condições de contorno ao componente.

Figura 10 – Malha em Modelo para MEF



Fonte: <http://www.metallica.com.br/avaliacao-de-uma-ligacao-parafusada-viga-coluna>.

As condições de contorno são um dos pontos mais importantes e mais difíceis da análise de elementos finitos, pois são grandes as chances de se omitir ou interpretar de forma errônea os dados de entrada das forças no componente a ser analisado e desta forma não obter os resultados corretos.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO

Conforme exposto no capítulo 1 deste trabalho, a proposta consistiu em analisar novas alternativas de material para o componente nervura de sapata de freio, que atualmente tem apresentado bom desempenho sem incidência de falhas em campo devido material ou processamento. Através dos conhecimentos adquiridos no desenvolvimento da bibliografia deste trabalho, foi realizada a pesquisa de materiais e o desenvolvimento de propostas para comporem o componente nervura, atendendo os requisitos de trabalho exposto no projeto original, que mantiveram ou possibilitaram redução dos custos de processamento e manufatura da peça e proporcionaram a redução de peso do componente com a redução da espessura da peça.

3.2 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO

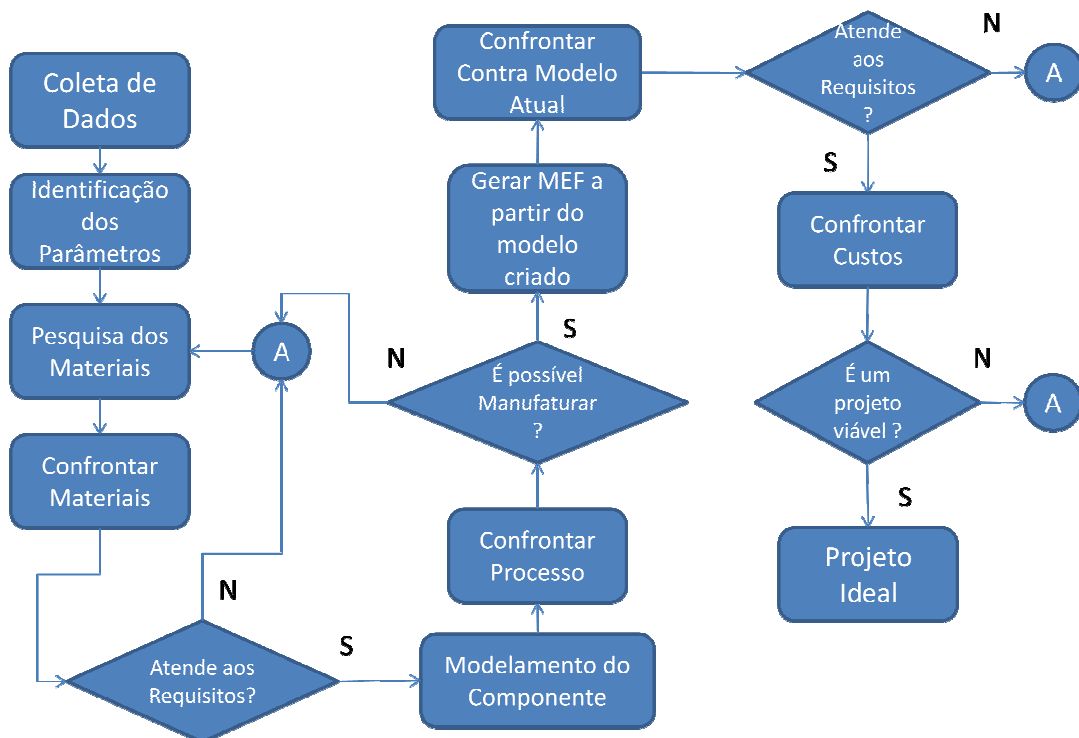
Através de pesquisa literária e consultas a fabricantes, foram coletados os dados dos materiais que fizeram parte do estudo, como: composição química, limite de resistência mecânica a tração, escoamento, ductilidade e custo. Foram selecionados os materiais mais adequados e criados os modelos para o MEF com espessura menor a já utilizada, limitando pelas especificações do projeto. Após a análise crítica dos modelos, os que obtiveram resultado inferior ao componente com aço SAE 1030 modificado, foram eliminados do estudo. Os materiais com desempenho igual ou superior foram avaliados no quesito custo de fabricação para compor os resultados deste trabalho.

Para a execução do desenvolvimento da proposta de troca de material, foram seguidos os passos conforme detalhado nos itens que seguem e resumidos no fluxograma de desenvolvimento do trabalho na figura 11.

- a) Coleta de dados do processo atual como: etapas, tempos de processamento e processo utilizado; e do componente como: peso, geometria e forças aplicadas ao componente.
- b) Identificação dos parâmetros com maior influência na estrutura do material e processamento da peça nas normas atuais de material e ensaios químicos e mecânicos do SAE 1030 modificado para posterior comparação.

- c) Pesquisa dos materiais que compõem as definições de projeto e processo especificadas e permitidas, conforme levantamento realizado.
- d) Confrontar os materiais propostos contra o material atual, nos quesitos peso, resistência mecânica e composição química.
- e) Validar o MEF com as novas propostas de material e espessura;
- f) Confrontar os custos de material e fabricação.

Figura 11 – Fluxograma de Trabalho



Fonte: O autor, 2014.

3.3 SITUAÇÃO ATUAL

3.3.1 Material SAE 1030 Modificado

A nervura de sapata de freio é fabricada em aço SAE 1030 modificado, com dimensionais diversos, conforme especificações de projeto para cada aplicação e cliente.

A modificação da norma SAE 1030 é especificada em norma interna da empresa Meritor, SPEC B-106-2, 2005 que solicita composição química alterada para a fabricação do produto fora dos Estados Unidos, esta especificação esta citada na Tabela 1, o limite de escoamento ou “*Yield Strength*” de 310MPa a 414MPa e o limite de resistência ou “*Tensile Strength*” de 517MPa a 689MPa, também são citadas na norma indicando a necessidade de

controles restritos para obter material com controles de composição química adicionais e maiores limites de resistência mecânica que a norma SAE 1030.

Para que suporte os desgastes e fadigas envolvidas, também se faz necessária têmpera por indução que é citada na norma interna da empresa Meritor SPEC 459-C, 2000, a qual é especificada no projeto da sapata. Esta norma solicita, nas regiões de came e ancoragem, dureza HRC 40 – 58, com penetração de 1,58mm de profundidade.

Tabela 1 – Composição Química SAE 1030 modificado

Elemento Químico	(%)
Carbono	0,27 – 0,34
Manganês	0,50 – 0,80
Silício	0,17 – 0,37
Fósforo	0,035 máx.
Enxofre	0,035 máx.
Cromo	0,25 máx.
Níquel	0,30 máx.
Cobre	0,25 máx.

Fonte: Adaptado da norma da empresa Meritor SPEC B-106-2, 2005.

Na Tabela 1 é mostrada a composição química da norma SAE 1030 modificado, com redução dos limites de fósforo e enxofre, que prejudicam a soldabilidade e a ductilidade do material e o acréscimo dos controles de máximo cromo, que melhora o desempenho do material em altas temperaturas, a temperabilidade e a resistência à corrosão. O níquel aumenta a resistência mecânica e tenacidade, proporciona maior resistência há corrosão e reduz a taxa de resfriamento crítico ajudando no tratamento térmico que em combinação com cromo aumenta a resistência e a dureza do material. O cobre aumenta a resistência à corrosão, mas apresenta desvantagens com trabalho em operações com alta temperatura (ASM 1, 1993).

Não há especificação de carbono equivalente na norma Meritor, SPEC B-106-2, 2005, segundo indicado pela empresa. Seguindo as especificações da Tabela 1 o aço atende as necessidades do produto e do processo plenamente.

A norma SPEC 459-C (2000) também indica a necessidade de efetuar o resfriamento do material utilizando aditivo de óleo polimérico com o intuito de evitar rachaduras ou fissuras no material.

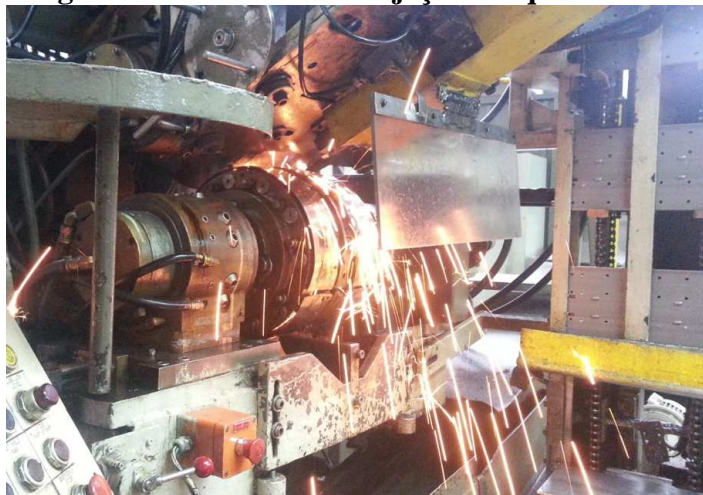
3.3.2 Processo de Manufatura

3.3.2.1 Soldadura por Projeção

Para o processo de solda do componente patim de freio, um rolo de solda, com raio compatível com o raio final do produto, é colocado na máquina de solda. Duas nervuras são fixadas hidraulicamente pelo dispositivo e giradas até o ponto de contato e tração da cobertura do patim, que é posicionada entre o rolo de solda inferior e o rolo de contato superior.

Quando as peças estão em posição de início de ciclo e em contato uma com a outra, o equipamento libera uma corrente de 10.000A o qual aumenta a temperatura das peças as elevando-as a temperaturas próximas do ponto de fusão. Simultaneamente a isso, uma força é aplicada neste mesmo ponto fundindo as duas peças diferentes por pressão (ASM 6, 1993).

Figura 12 – Soldadura Projeção Máquina RWC



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2014.

Este processo ocorre durante 0,2 segundos com 80% da potência total do equipamento, em torno de 600kVa, o equipamento continuamente roda o rolo de solda e repete este processo em cada posição de embosse programado, enquanto funde os pontos também calandra o patim deixando a cobertura, originalmente plana, com o raio da nervura, a figura 12 mostra o processo descrito.

3.3.2.2 Têmpera por Indução

O patim de freio recebe tratamento térmico nas regiões de came e ancoragem.

Estas são as regiões de contato entre nervura e roletes de atuação no freio montado, onde a norma Meritor 459-C, 2000 indica dureza, profundidade e instrui a necessidade de utilização de aditivo de óleo polimérico para o correto resfriamento e atendimento dos requisitos sem aparecimento de rachaduras ou fissuras no material.

Desta forma parametrizam-se as indutoras seguindo as especificações e verificando através de análise quantitativa de amostras para se atingir o especificado, o equipamento possui potencia de 136 kW, utiliza-se variações de processo entre 40 e 100% da potência para atingir o requerido, com tempos de aquecimento variando de 9 a 11 segundos e tempo de resfriamento de 5 a 8 segundos com emulsão de óleo polimérico de 3 a 5% e temperatura de operação da emulsão entre 10 e 45°C.

Estas especificações são reguladas conforme a variação de dureza do lote fabricado, uma unidade a cada cem peças é verificada e se necessário os parâmetros são alterados conforme o descrito a cima.

3.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Através de pesquisa em literatura como ASM 1 (1993), normas técnicas de materiais metálicos e contato direto com as usinas e siderurgicas fornecedoras, Usiminas, Ruukki, CSN, Arcelor Mital, Cosipa, Villares Mettals S.A e Foshan NEU Special Steel Technology Co. Ltd., foi desenvolvida a pesquisa para compor a lista de possíveis materias substitutos, com características químicas e mecânicas, compatíveis com as necessidades do produto para alteração de projeto de redução de peso bruto do componente nervura de sapata de freio, substituindo o atual aço utilizado SAE 1030 modificado.

O critério de seleção foi baseado na composição química dos materiais com enfoque nos controles máximos de fósforo e enxofre que atendecem a norma da empresa Meritor para a aplicação.

Conforme ASM 6 (1993), especifica que estes elementos em excesso podem prejudicar a fusão dos limites de grãos podendo causar a falha da fusão dos materiais na solda.

Controles de cromo e níquel, devido suas propriedades favoráveis para o tratamento térmico, conforme (ASM 1, 1993).

Controle de mínimo carbono, na faixa de 0,26, para garantir a temperabilidade por indução para materias de médio carbono (ASM 4, 1991).

Nas propriedades mecânicas, buscando materiais com mínimo limite de escoamento superiores ao máximo limite de escoamento em relação ao material atual.

E critérios da engenharia de processos da empresa para que o material selecionado não exija alterações drásticas no processo de manufatura da nervura e patim.

Durante a pesquisa, diversos fatores que poderiam influenciar o resultado do trabalho foram indentificados como por exemplo, as diferentes características em uma mesma norma de material processados por LQ ou TF ou as restrições impostas pelas usinas, que por questões de capacidade de processamento, podem processar materias com restrições dimensionais em largura e espessura, dependendo do processo LQ (laminado a quente) ou TF (trefilado a frio), além de trabalharem com normas próprias de material ou por elevados custos de processamento devido a necessidade de set up de linhas de laminação para manufaturar norma de aço, usualmente não comercializada por ela.

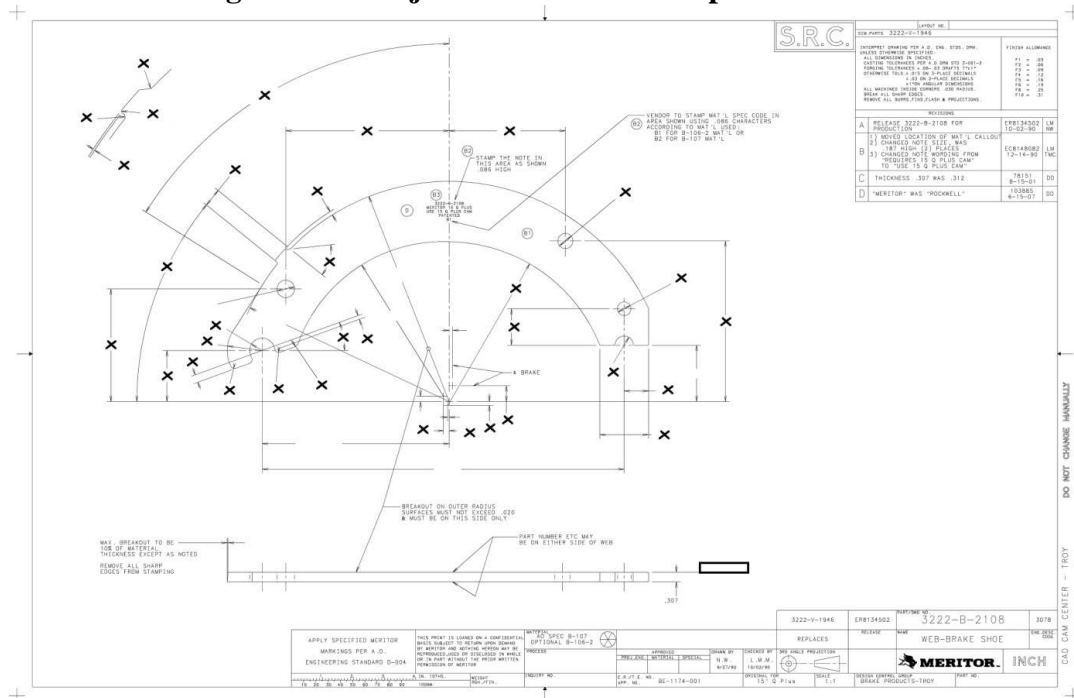
3.5 MODELO PARA MEF

3.5.1 Alteração do Projeto Atual

O projeto da nervura de sapata de freio, exemplificado na figura 13, foi mantido conforme o projeto original com exceção da espessura.

Com foco na mudança da espessura do componente, o remodelamento da peça foi realizado, utilizando basicamente duas espessuras menores que os atuais 8,0mm de projeto, foram utilizados 6,35mm e 5,0mm, como alternativas de espessura para a nervura de sapata de freio com o material atual e os propostos. Estas espessuras foram selecionadas devido as restrições de catálogo das usinas, conforme citado no capítulo 3.4. Os materias selecionados com potencial para substituir o atual, não possuem em sua maioria, fatores de multiplicação com quebra de espessura.

Figura 13 – Projeto de Nervura de Sapata de Freio



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2014.

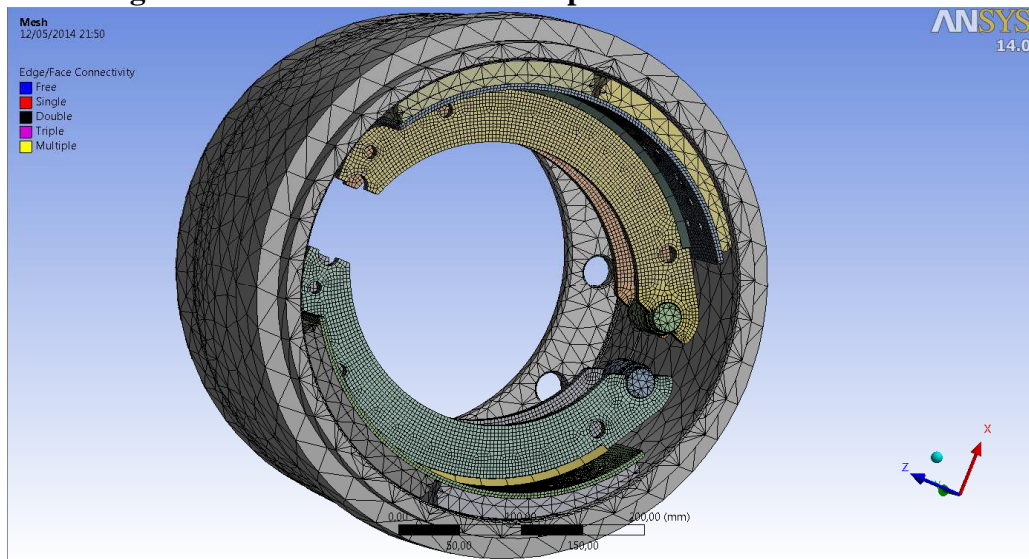
3.5.2 Preparação do Modelo

3.5.2.1 Geração da Malha do Modelo

Após os ajustes de projeto do componente nervura de sapata de freio e respectiva montagem do modelo tridimensional, os demais componentes foram unidos ao projeto. Estes componentes como lona de freio, tambor de freio e roletes, foram importados junto ao modelo da sapata de freio com as nervuras nas espessuras 5,0mm, 6,35mm e 8,0mm, para geração do modelo numérico e MEF, no software comercial ANSYS 14.0 para análise de elementos finitos com auxílio do engenheiro responsável Jonathan Chiu.

Para a geração da malha do modelo foram utilizados elementos do tipo sólido. A malha para o elemento patim foi gerado no tipo hexaédrico com 3,0mm. Os demais elementos foram gerados no tipo tetraédrico totalizando 145535 elementos e 454572 nós. A malha do patim foi a única refinada pois é o objeto principal de estudo. A figura 14 mostra a malha gerada para o MEF e sua distribuição nos componentes.

Figura 14 – Malha dos Elementos para MEF do Patim de 15”



Fonte: O autor, 2014.

3.5.2.2 Caracterização dos Elementos

Para que o estudo em MEF tenha resultados compatíveis com as condições de aplicação, os materiais utilizados no estudo foram caracterizados conforme suas condições reais de aplicação, inserindo no software de análise de elementos finitos as informações como: módulo de Young, coeficiente de Poisson, densidade, tensões de escoamento e tensões de ruptura.

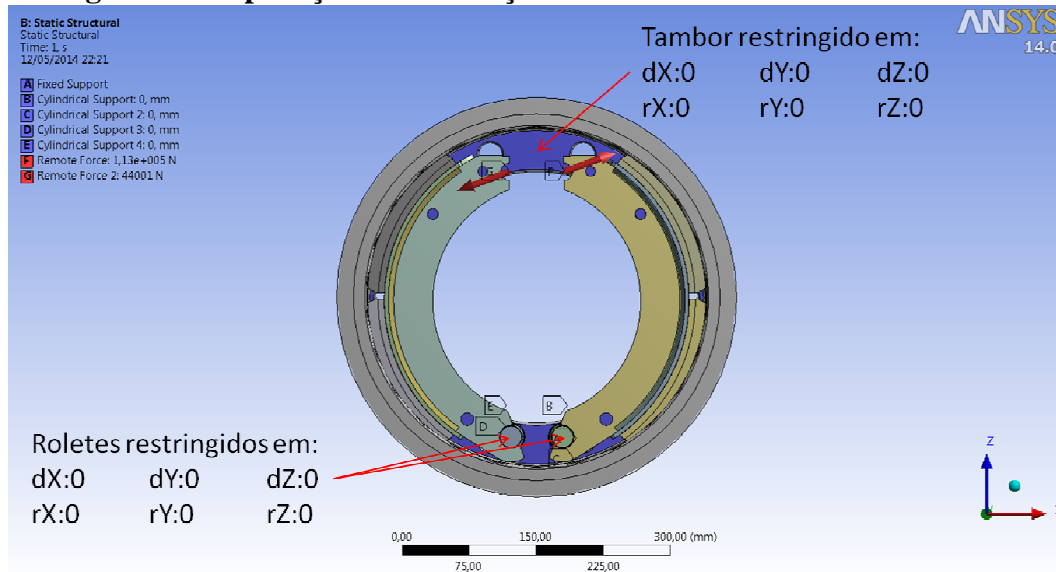
As densidades utilizadas foram mensuradas para cada tipo de material, ($7,2\text{g/cm}^3$ para o ferro fundido do tambor, $2,05\text{g/cm}^3$ para o composto da lona de freio e para os aços do patim e rolete $7,85\text{g/cm}^3$), os módulos de Young, coeficiente de Poisson, tensões de escoamento e tensões de ruptura, para os aços da sapata foram configurados conforme a especificação técnica de cada aço. Os valores considerados para tensões de ruptura e tração são sempre os mínimos da norma, para avaliar a pior condição do material.

Para os demais itens foram considerados módulo de Young, (170GPa para o tambor de freio, 6.000MPa para a lona de freio e 210GPa para o rolete), o coeficiente de Poisson, ($0,28$ para o tambor de freio, $0,33$ para a lona de freio e $0,3$ para o rolete).

3.5.2.3 Condições de Contorno

As condições de contorno para a análise dos modelos criados como o cálculo de forças aplicadas e em que condições de trabalho e atrito do freio, são informações sigilosas da *joint venture* com a empresa Meritor, asquais não podem ser divulgadas.

Figura 15 – Aplicação das Restrições de Movimento Tambor e Roletes



Fonte: O autor, 2014.

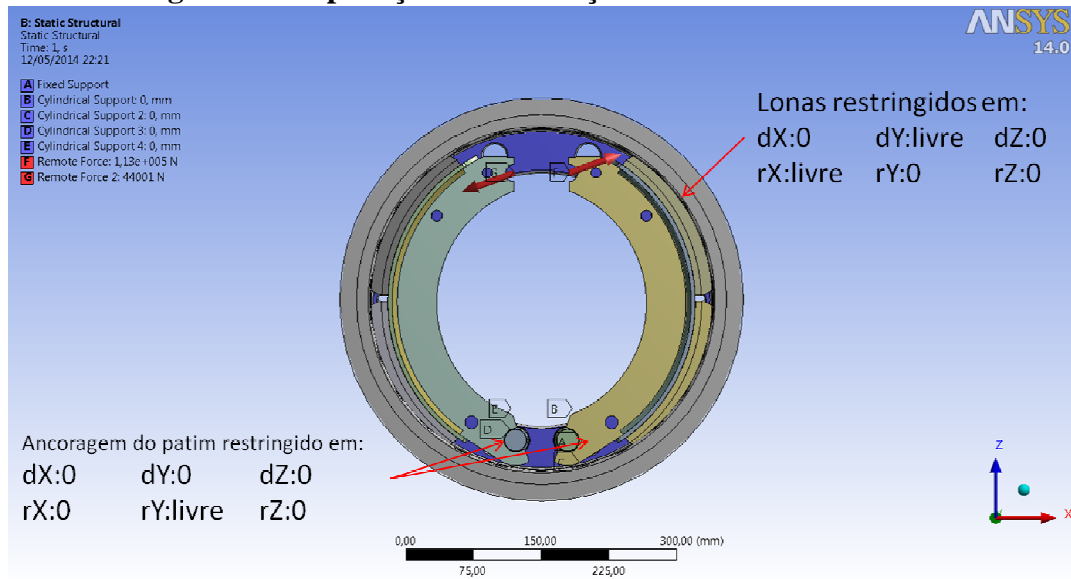
Serão apresentadas as condições de contorno relevantes para os modelos, de forma superficial mas concretas para a análise e entendimento. O critério de falha considerado para o desenvolvimento deste trabalho é baseado nas teorias de tensão equivalente de (Von Mises).

O primeiro passo para a aplicação das condições de contorno é aplicar as restrições de movimentação nos seis graus de liberdade do modelo, restringindo a movimentação a apenas o que é compatível com os modelos reais.

Na figura 15 pode-se verificar a completa restrição de movimento do tambor de freio e os roletes de apoio da ancoragem das sapatas, simulando a montagem do conjunto de freio dentro do tambor estático.

A aplicação da força é realizada pelo conjunto câmara e eixo expensor do freio na região de came das sapatas, esta aplicação mostrada na figura 16, onde pode-se verificar a liberdade de rotação no eixo Y na região de ancoragem e de afastamento do centro simulado do eixo expensor nos sentidos X e Y na região de came dos patins, onde os sentidos dos vetores de força aplicadas nas sapatas são indicadas pelas setas vermelhas.

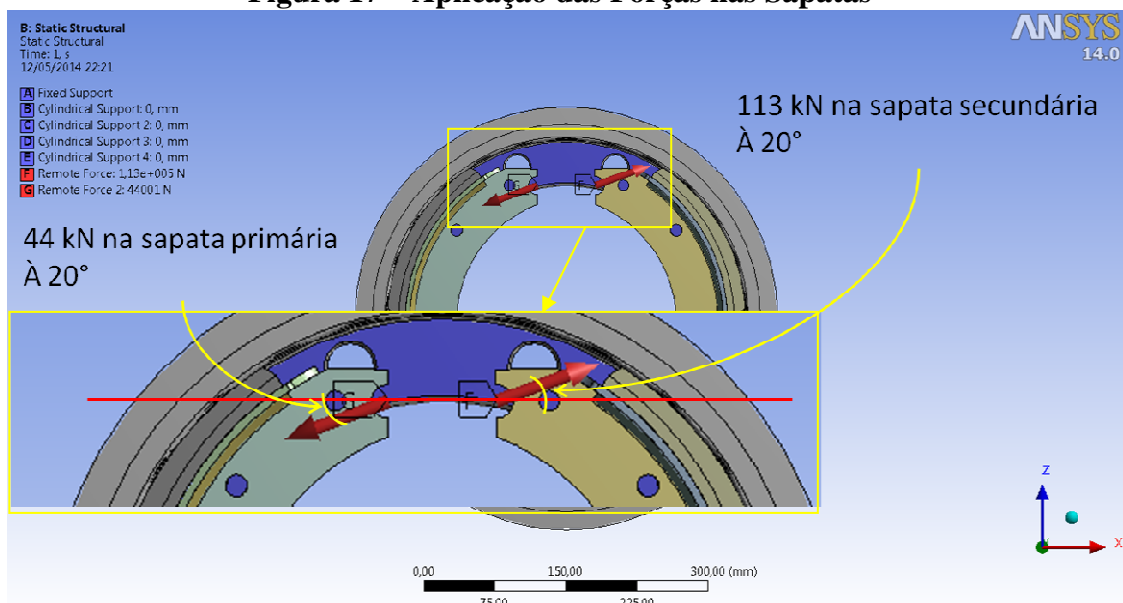
Figura 16 – Aplicação das Restrições de Movimento Patim



Fonte: O autor, 2014.

Para cada vetor criado uma força específica é aplicada. Para a sapata secundária de freio, o contato com o sentido de giro do tambor é mais severa, gerando forças resultantes maiores em comparação a sapata primária do freio. As forças calculadas para esta análise consideram uma condição mais severa, mas compatível com a realidade de aplicação do freio, 113kN de força com 20° de inclinação positiva para a sapata secundária e 44kN com 20° de inclinação negativa para a sapata primária, conforme figura 17.

Figura 17 – Aplicação das Forças nas Sapatas



Fonte: O autor, 2014.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MATERIAIS SELECIONADOS NA PESQUISA

Levando em consideração os fatores indicados no capítulo 3.4 e buscando o material que proporcionaria o melhor desempenho com menor peso em relação a nervura atual, foram selecionados os aços indicados na tabela 2 e tabela 3.

Tabela 2 – Composição Química dos Materiais Substitutos Selecionados

Norma	Composição Química, (%)									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	B
SAE 4140	0,38 0,43	0,75 1,0	0,035 máx.	0,04 máx.	0,15 0,35	N/A	0,8 1,1	0,15 0,25	N/A	N/A
SAE 4340	0,38 0,43	0,6 0,8	0,035 máx.	0,04 máx.	0,15 0,35	1,65 2,0	0,7 0,9	0,2 0,3	N/A	N/A
Ruukii – B27	0,27 0,33	1,2 máx.	0,025 máx.	0,15 máx.	0,25 máx.	0,3 máx.	N/A	N/A	N/A	0,002 méd.
CSN – AC 60 BQ	0,65 máx.	0,9 máx.	0,024 máx.	0,10 máx.	0,3 máx.	N/A	N/A	N/A	0,05 máx.	N/A
CSN – AC 60 BG	0,65 máx.	0,9 máx.	0,024 máx.	0,10 máx.	0,3 máx.	N/A	N/A	N/A	0,05 máx.	N/A

Fonte: O autor, 2014

A tabela 2 mostra a norma dos materiais selecionados em função de sua composição química, enquanto a tabela 3 traz as informações quanto as propriedades mecânicas.

Estes materiais foram selecionados utilizando os critérios indicados anteriormente neste capítulo. É importante citar alguns motivos que levaram a escolha destes materiais além de suas propriedades compatíveis com o procurado pelo estudo.

Tabela 3 – Materiais Selecionados na Pesquisa, Propriedades Mecânicas

Norma	Resistência Tração	Limite Escoamento	Dureza Material	Modulo Elasticidade	Poisson
	MPa min.	MPa min.	HB méd.	GPa	
SAE 4140	655	420	197	205	0,3
SAE 4340	745	472	260	199	
Ruukii – B27	620	380	170	210	
CSN – AC 60 BQ	600	500	253	210	
CSN – AC 60 BG	500	400	253	210	

Fonte: O autor, 2014

O aço SAE 4140 foi selecionado por possuir composição química e propriedades mecânicas dentro das características procuradas. Este aço em específico não foi encontrado nacionalmente processado em bobina, apenas em barras com perfis redondos, quadrados, sextavados e retangulares.

Como foi possível encontrar exportadores em outros países com este material disponível laminado, recozido e bobinado em espessura compatível ao estudo, menores que 8,0mm, o mesmo foi incluído na lista para análise, pois possui uma combinação balanceada entre temperabilidade, resistência mecânica e força em condições de trabalho moderadamente severas (ASM 1, 1993).

O aço SAE 4340 se encontra na mesma situação que o aço SAE 4140 quanto a produção nacional e também possui as características químicas e mecânicas compatíveis com os requeridas. Este aço possui alto nível de ductilidade além de temperabilidade, resistência mecânica, força e alta resistência ao desgaste (ASM 1, 1993).

O aço B27, é um aço ligado a boro fornecido por importador nacional, com características compatíveis ao solicitado pelo estudo, conforme já citado neste capítulo, e segundo o fabricante, com bom desempenho em aplicações estruturais de alta resistência e com o elemento químico boro em sua composição, que permite aumento de sua resistência mecânica e boa compatibilidade com tratamento térmico elevando sua resistência ao desgaste (ASM 1, 1993).

Os aços AC60 fabricado no Brasil, possuem características químicas e mecânicas compatíveis aos solicitados no estudo e disponíveis em duas versões, BQ e BG, bobina quente e bobina grossa respectivamente, esta nomenclatura é dada pelo fabricante. Devido processamento elas oferecem diferentes propriedades mecânicas e espessuras singulares.

A BQ pode ser fabricada com até 5mm de espessura enquanto a BG de 5,1mm a 6,3mm de espessura. São aços criados para construção mecânica com boa temperabilidade pelo alto teor de carbono mas pelo mesmo motivo tem redução de sua soldabilidade, o que deverá ser levado em consideração nos testes práticos, caso seja selecionado para prototipagem, testes de processo e testes mecânicos (ASM 1, 1993).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA NERVURA DE SAPATA SAE 1030 MODIFICADO

Atraves de amostras de nervura de freio, figura 5, coletadas no setor de produção da empresa Master Sistemas Automotivos Ltda. foram realizados ensaios de tração retangular

seguindo norma NBR 6892, para averiguar se a resistência a tração e o limite de escoamento do material das amostras atendia o especificado na norma da empresa Meritor, SPEC B-106-2, 2005, o corpo de prova feito conforme norma NBR 6673, foi submetido a 80kg de pré-carga e velocidade de avanço mecânico de oito mm/min. gerando os resultados que podem ser vistos nas tabelas 4 e 5, a figura 18 mostra o corpo de prova após o ensaio de tração.

Ensaio químico conforme norma ASTM E-415-08-2008 e dureza Rockwell C seguindo a norma ABNT NBR NM ISO 6508-1-2009 também foram realizados com o mesmo intuito de averiguar o atendimento a norma da empresa Meritor SPEC B-106-2, 2005.

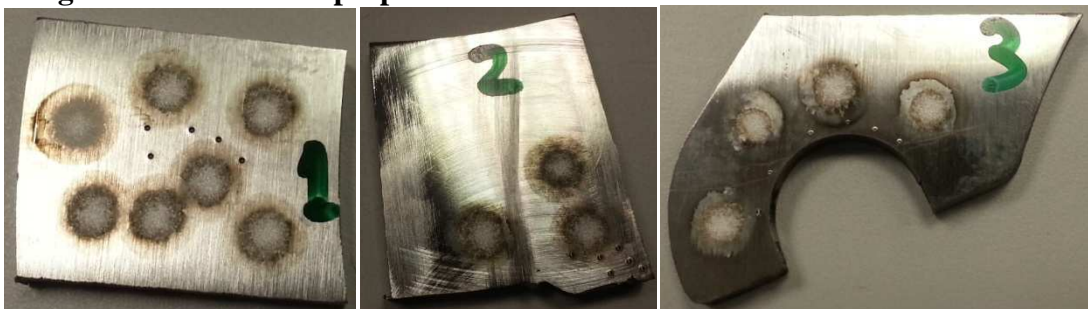
Figura 18 – Ensaio de Tração



Fonte: O autor, 2014.

Na figura 19 pode-se ver os corpos de prova criados a partir das nervuras de freio para análise química e de dureza.

Figura 19 – Amostras preparadas de nervura de freio SAE 1030 modificado



Fonte: O autor, 2014.

Os três corpos de prova foram submetidos a espectrometria e dureza para verificar a composição química das amostras e diferenciais de dureza, na amostra 1: região não afetada pela solda ou tratamento térmico, amostra 2: região afetada ou próxima a região soldada e amostra 3: região com tratamento térmico por indução.

As análises demonstraram que o componente atual atende completamente os requisitos de projeto especificados para o componente nervura de freio. Conforme demonstrado

no Anexo A, a composição química do material da nervura analisada por espectrometria e a dureza nas regiões indicadas assim como as características mecânicas encontradas, atendem as especificações de projeto expostos no capítulo 3.3.1.1.

Tabela 4 – Norma e Resultado da Análise Química por Espectrometria

Norma	Composição Química, (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu
SAE 1030 modificado	0,27 0,34	0,50 0,80	0,035 máx.	0,035 máx.	0,17 0,37	0,030 máx.	0,025 máx.	0,025 máx.
SAE 1030	0,27 0,34	0,50 0,80	0,045 máx.	0,04 máx.	N/I	N/I	N/I	N/I
Ensaio								
SAE 1030 modificado	0,27	0,74	0,02	0,002	0,24	0,014	0,014	0,011

Fonte: O autor, 2014

Na tabela 4 e tabela5 pode-se verificar além dos resultados obtidos pelos testes, também informação de comparação do que o projeto solicita para o componente nervura na norma SAE 1030 modificado e a norma SAE 1030 para facilitar a comparação dos itens especificados e os medidos.

Tabela 5 – Resultado do Ensaio de Tração, Dureza e Informações Comparativas

Norma	Propriedades Mecânicas					
	Resistência Tração	Limite Escoamento	Dureza Material	Dureza Têmpera	Modulo Elasticidade	Poisson
	MPa	MPa	HB	HRC	GPa	
SAE 1030 modificado	517 689	310 414	N/I	40 58	210	0,3
SAE 1030	470 méd.	260 méd.	137	N/I	200	0,3
Ensaio						
SAE 1030 modificado	554	347	158	50	-	-

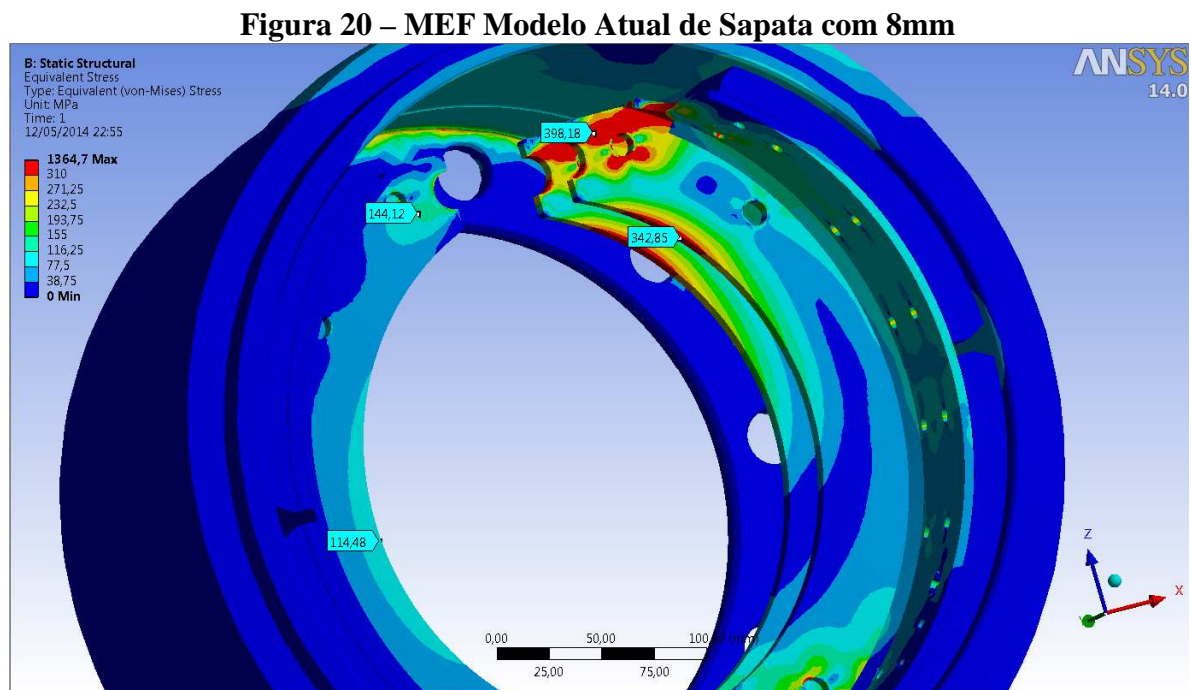
Fonte: O autor, 2014

Pode-se verificar que a norma SAE 1030 não abrange todos os parâmetros de controles que a norma SAE 1030 modificado.

4.3 MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO DO PATIM ATUAL

Para que se possam comparar os modelos dos resultados obtidos com os novos materiais e a nervura no estado atual, foram geradas análises da condição atual de nervura com SAE 1030 modificado e 8,0mm de espessura e outras duas análises com 6,35mm e 5,0mm de espessura. A figura 20 mostra o modelo matemático da sapata de freio na situação atual e os esforços gerados na nervura para análise.

Pode-se verificar que os pontos de maior tensão, em vermelho, quando em momento de carga, podem elevar as tensões na nervura em torno de 400MPa, tensão 28% maior que o limite mínimo de escoamento especificado na norma SAE 1030 modificado para o material e muito próximo do limite superior de escoamento da norma SAE 1030 modificado, este limite superior é 33,5% maior que o limite mínimo de escoamento especificado na norma SAE 1030 modificado.



Fonte: O autor, 2014.

O modelo, bem como as condições de contorno aplicadas para a avaliação do trabalho são validadas quando apresentaram resultados muito próximos aos aplicados em um freio em serviço, como mostram as figuras 21 e 22.

Nestas é possível visualizar um conjunto de sapatas que foram testadas até a ruptura em condições acima do usual, de aplicação em campo de prova, e tiveram falha por ruptura nos locais apontados pela análise do patim atual, que se mostram em vermelho na figura 20.

Na figura 21 observa-se a ruptura da região do corpo da peça próximo a região de came da peça.

Figura 21 – Patim com Ruptura no Corpo Analisado no Campo de Provas



Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2014.

Na figura 22 é possível observar o rompimento na região de came da nervura.

Figura 22 – Patim com Ruptura no Came Analisado no Campo de Provas

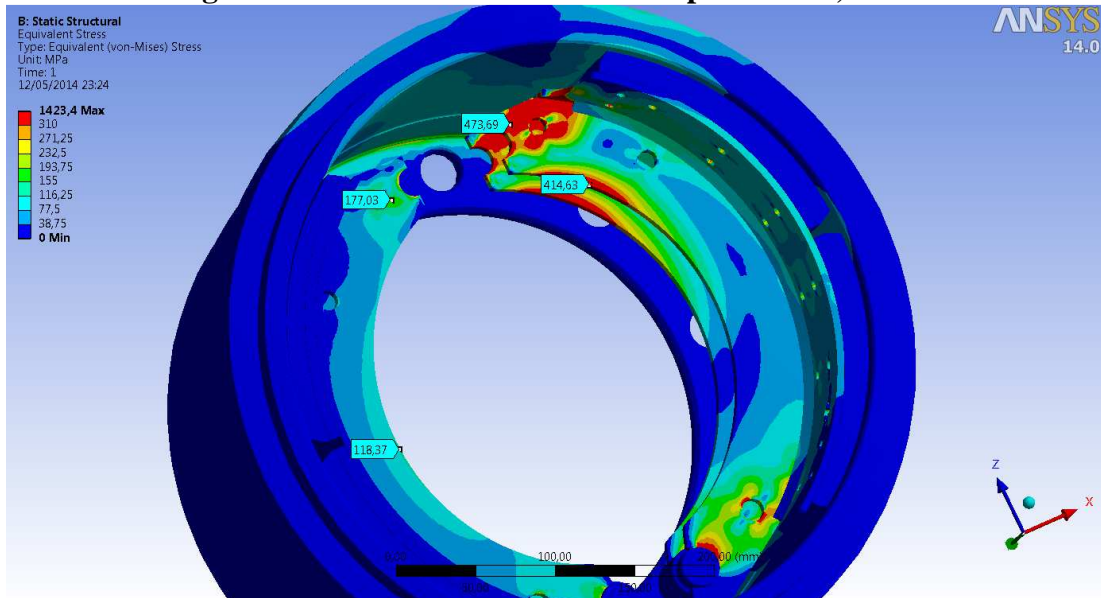


Fonte: Master Sistemas Automotivos Ltda., 2014.

As figuras 23 e 24 mostram as análises por MEF do patim atual com a espessura diminuída.

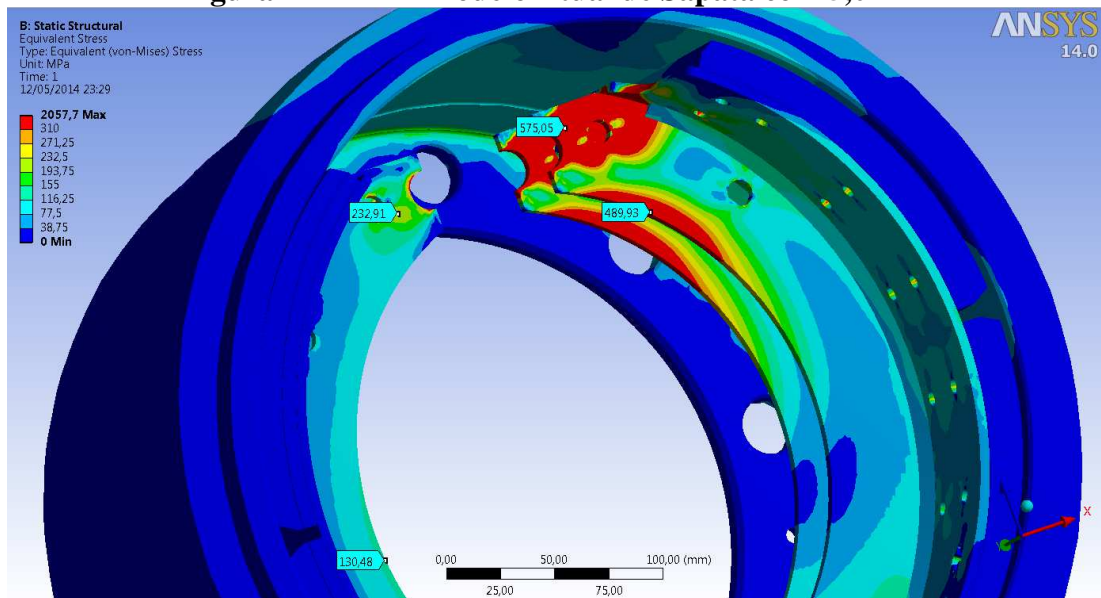
Pode-se afirmar que as regiões de maior tensão são as mesmas que para 8,0mm e aumentam de acordo com a diminuição da espessura, e que os esforços sofridos pela peça se agravam para que ela consiga manter as solicitações mecânicas exigidas dela.

Figura 23 – MEF Modelo Atual de Sapata com 6,35mm



Fonte: O autor, 2014.

Figura 24 – MEF Modelo Atual de Sapata com 5,0mm



Fonte: O autor, 2014.

Consequentemente as tensões identificadas nas mesmas regiões são maiores que da espessura original e também maiores do que a especificação de limite de escoamento máxima que o material SAE 1030 modificado consegue suportar, de 414MPa. Para a sapata com nervura em 6,35mm a maior tensão encontrada foi de 474MPa.

Para a sapata com nervura de 5,0mm de espessura a tensão subiu para 575MPa.

Estas análises invalidaram a possibilidade de manter o mesmo material já utilizado e apenas reduzir sua espessura, pois as tensões encontradas estavam 14,5% superior para a espessura de 6,35mm e 40% para espessura de 5,0mm, isto é, maiores que a tensão máxima do material. Isso ocorreu devido à diminuição da área onde os esforços foram aplicados, elevando a concentração de tensões nas regiões vistas em vermelho nas figuras 23 e 24 de maior tensão.

4.4 MODELAMENTO MATEMÁTICO DO COMPONENTE NOS AÇOS PROPOSTOS

Utilizando as mesmas forças aplicadas nas sapatas de freio com nervura em aço SAE 1030 modificado e utilizando como base de análise as imagens já geradas mostradas nas figuras 23 e 24, devido à similaridade das imagens, foram realizados MEF para os materiais propostos na tabela 5 com espessuras de 6,35mm e 5,0mm.

Os resultados das análises indicam quanta tensão à nervura deve suportar.

A propriedade de limite de escoamento do material é a propriedade comparada com a resultante obtida do MEF. Esta comparação é feita com base na norma do material, que indica a tensão de escoamento mínima que o material deve suportar.

Se a tensão obtida no MEF for menor que a mínima da norma do material, indica que o material é compatível com a operação nas condições simuladas. Para os casos em que a tensão do MEF ultrapassa a mínima da norma do material, foi utilizado o critério de comparação com o resultado da análise do patim com nervura em aço SAE 1030 modificado com 8,0mm de espessura, onde as tensões mínimas e máximas são especificadas na norma e a diferença entre estes dois valores é de 33,5%, conforme indicado no capítulo anterior.

Este mesmo percentual foi aplicado nos materiais escolhidos, calculando assim os seus respectivos limites máximos de escoamento, para a realização das análises, visto que a norma indica apenas limite mínimo de escoamento, conforme indicado na tabela 5 para todos os materiais selecionados.

A tabela 6 mostra o resultado da análise realizada utilizando as características do material SAE 4140, que podem ser vistas na tabela 5, com 6,35mm de espessura na nervura.

Pode-se observar que a maior tensão obtida na região de came do patim conforme exemplo da figuras 23 foi de 468MPa que é superior a tensão mínima de escoamento do material indicada na norma SAE 4140, 420MPa. Diferença de 11,5% entre a tensão máxima

encontrada no modelo a tensão mínima de escoamento do material. Esta análise indica que este material, nesta espessura, pode ser utilizado.

As condições aplicadas para o mesmo material, mas com espessura reduzida para 5,0mm na nervura, indica elevação das tensões conforme a figura 24 exemplifica.

Pode-se verificar que a tensão aumentou para 571MPa com a redução da espessura para 5,0mm, 36% superior ao limite mínimo de escoamento da norma SAE 4140, como esta norma não indica o limite superior de escoamento e a atual norma SAE 1030 modificado indica 33,5% de diferença entre o limite mínimo e máximo de escoamento, este resultado mostra que o aço SAE 4140 com 5,0mm de espessura não pode ser utilizado.

A partir dos resultados encontrados pelo MEF para o aço SAE 4140, seguiram-se os modelamentos para os demais aços propostos com redução de espessura. Por apresentarem propriedades mecânicas superiores às do aço SAE 4140 buscando assim maior redução na espessura.

A tabela 6 apresenta as tensões encontradas no segundo aço proposto, SAE 4340 com espessura na nervura de 6,35mm.

Pode-se verificar que a tensão encontrada na região de came do patim foi de 468MPa que é indicada na cor vermelha no modelamento matemático apresentado na figura 23, menor que a tensão mínima de escoamento do material SAE 4340 que é de 472MPa.

Com o resultado obtido pelo MEF, é seguro afirmar que o material SAE 4340 com 6,35mm de espessura é possível de ser utilizado.

A tabela 6 mostra a análise para o material SAE 4340, com espessura de 5,0mm na nervura.

Pode-se afirmar que a condição do material com espessura de 6,35mm de espessura não se repete com espessura de 5,0mm. A maior tensão encontrada, de 575MPa, é 100MPa superior a norma do aço o que resulta em 21% maior que o limite mínimo de escoamento do aço SAE 4340.

Este resultado, se comparado à análise do aço SAE 1030 modificado com 8,0mm de espessura, se encontra na faixa percentual dentro dos limites de tensão máxima de material.

Validando assim a utilização do aço SAE 4340 com 5,0mm de espessura.

Os resultados para o terceiro aço proposto o microligado B27, são vistos na mesma tabela 6.

Pode-se verificar em ambos os casos que as tensões encontradas foram de 471MPa e 574MPa, para as espessuras de 6,35mm e 5,0mm respectivamente, são 23% e 51% maior que o

limite mínimo de escoamento especificado pela empresa fornecedora para este aço, de 380MPa.

Este resultado valida a utilização do aço microligado B27 com 6,35mm de espessura, mas invalida este mesmo aço com 5,0mm de espessura devido à elevada diferença entre o limite de escoamento mínimo especificado e o resultado do MEF para esta espessura.

Os resultados de tensão de escoamento calculados matematicamente para o aço da CSN AC60 BG, pode ser visto na tabela 6 para espessura de 6,35mm .

Em bobina grossa (BG) com limite de escoamento de 400MPa mínimo segundo a especificação do fabricante, indica que para a espessura de 6,35mm a maior tensão encontrada foi de 474MPa, 18,5% superior ao limite mínimo de escoamento conforme a norma CSN AC60 BG.

O aço CSN AC60 BQ, que permite espessura menor segundo fabricante, foi analisado com espessura de 5,0mm e tensão mínima de escoamento de 500MPa.

Conforme se pode ver na tabela 6, a maior tensão identificada na nervura, atingiu 573MPa, 14,6% superior aos limite mínimo de escoamento do material especificado pelo fabricante.

Nestas condições, conforme demonstrados pelo MEF, os aços CSN AC60 com espessuras de 6,35mm e 5,0mm suportam as cargas exigidas pelo modelo, em comparação aos resultados do modelo de 8,0mm do aço SAE 1030 modificado, podendo assim ser utilizados.

Na tabela 6 é possível avaliar e comparar com o aço atual, o carbono equivalente (Ceq.) de cada aço proposto.

Conforme ASM 4 (1993) o as medidas de Ceq. a baixo de 0,40 possuem boa soldabilidade, de 0,45 e 0,60 média soldabilidade e acima de 0,60 má soldabilidade.

Tabela 6 – Resultados das Análises por MEF dos Materiais Propostos

Material	Espessura (mm)	Tensão MPa	Ceq
SAE 1030 Mod	8	398,18	0,401
	6,35	473,69	
	5	575,05	
SAE 4140	6,35	468,15	0,7633
	5	571,29	
SAE 4340	6,35	468,16	0,7167
	5	575,25	
B27	6,35	471,41	0,6767
	5	574,41	
AC 60 BG	6,35	473,94	0,75
AC 60 BQ	5	572,75	

Fonte: O autor, 2014

A medida de carbono equivalente indica que os materiais analisados não seriam eficientes no processo de soldagem. Mas para comprovar que no processo específico de fabricação de nervura de sapata de freio com soldadura projeção estes materiais não poderão ser usados, testes de soldagem com os materiais devem ser realizados antes de descartá-los, após a análise de MEF ter aprovado grande parte dos aços selecionados.

4.5 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS POR MEF E CUSTO DOS AÇOS PROPOSTOS

Os resultados apresentados no item 4.4, possibilitam avaliar de forma crítica as tensões calculadas para cada aço proposto, validando ou invalidando mecanicamente a sua prototipagem para posteriores ensaios físicos com o componente.

As diferenças de tensão encontradas em um mesmo material, mas com espessuras diferentes, ocorrem devido à diminuição de área onde os esforços são aplicados. As tensões se distribuem em uma área menor ou maior causando, em espessuras menores, a elevação da tensão quando solicitada devido às forças aplicadas serem inversamente proporcionais à área onde são aplicadas.

O aço SAE 4140 com 6,35mm de espessura demonstrou desempenho equivalente ao aço SAE 1030 modificado com espessura de 8,0mm. Conforme esta análise a diferença de 11,5% entre a tensão encontrada no MEF e a mínima tensão de escoamento suportada pelo SAE 4140, em relação ao material atual, validam a prototipagem para testes práticos e de processo deste material nestas condições.

Já o mesmo material SAE 4140 com espessura de 5,0mm, obteve resultado com 36% de elevação de tensão em relação ao limite mínimo de escoamento permitido pela norma SAE 4140, comparando ao resultado do modelo SAE 1030 modificado, invalida a utilização deste aço nesta condição por obter elevação de tensão superior percentualmente à norma atual.

O aço SAE 4340 com espessura de 6,35mm de espessura demonstrou desempenho superior em comparação ao componente atual com 8,0mm de espessura, apresentando tensões menores que a tensão mínima de escoamento indicado pela norma, validando a prototipagem para testes práticos nestas condições. Com 5mm de espessura o mesmo material SAE 4340 obteve elevação das tensões em 21% em relação as tensões mínimas de escoamento da norma, também validando para testes práticos nesta condição.

O aço microligado Ruukii B27 demonstra resultados satisfatórios para espessura de 6,35mm com elevação de 23% nas tensões de escoamento em relação à norma indicada pelo

fabricante, mas com 51% de elevação nas tensões com espessura de 5,0mm em relação ao limite mínimo de escoamento da mesma norma, validando a prototipagem com o material em 6,35mm mas invalidando com 5mm de espessura.

O aço AC 60 da CSN obteve bons resultados em ambas as espessuras com 18,5% de elevação de tensão de escoamento em relação à norma do fabricante com espessura de 6,35mm e 14,6% de elevação de tensão de escoamento em relação à norma com 5,0mm de espessura, validando em ambos os casos a prototipagem para testes práticos do material, em comparação com o MEF do material atual SAE 1030 modificado com 8,0mm.

Entretanto para que a utilização destes materiais seja viabilizada, uma análise com diferenças de custos se faz necessária.

A tabela 7 mostra as diferenças de custo atingidas com os materiais selecionados, demonstrando seus potenciais em percentual em relação ao material atual com espessura de 8mm, 6,35mm e 5mm. Onde os valores positivos indicam as perdas percentuais no material e os valores negativos os ganhos potenciais pela diferença do custo dos materiais já calculados em relação à diferença de peso do componente nervura de freio.

Os materiais SAE 4140, SAE 4340 e AC 60, demonstraram bons ganhos financeiros com a redução de espessura da nervura, enquanto o material B27 por ser um aço ligado ao boro demonstrou um custo consideravelmente maior ao do material atual, mesmo com a redução do peso através da redução de espessura avaliada. Conforme se pode verificar na tabela 7.

Os custos para a avaliação e comparação dos preços dos aços, foram obtidos através de simples cotação sem nenhum tipo de negociação ou solicitação de condições especiais para a fabricação ou fornecimento do produto.

Tabela 7 – Diferença de Custos Entre SAE 1030 modificado e Outros Materiais

Material	8mm	6,35mm	5mm
4140	-36%	-50%	-60%
4340	-36%	-50%	-60%
B27	122%	76%	38%
AC 60 BQ	N/A	N/A	-29%
AC 60 BG	N/A	-8%	N/A

Fonte: O autor, 2014

Os aços SAE 4140 com 6,35mm, SAE 4340 com 6,35mm e 5,0mm e o aço AC 60 BQ com 5,0mm, foram os que apresentaram melhores condições de redução de custo.

O aço B27, apesar de demonstrar capacidade mecânica com espessura de 6,35mm gera 76% de elevação de custos com matéria prima no componente nervura, sendo assim descartado como possível substituto.

O material AC 60 BG com 6,35mm traz pouca vantagem se comparado ao AC 60 BQ tanto financeiramente quanto mecanicamente, sendo desta forma descartada como possível substituto.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste estudo foi atingido. É possível reduzir em até 37,6% o peso do componente nervura através da diminuição da espessura juntamente com a mudança de material.

É importante citar que um freio Scame como o estudado neste trabalho, possui quatro nervuras em seu corpo. Um veículo como um caminhão com carreta possui em média seis eixos ao todo, cada eixo possui dois freios, isso totaliza quarenta e oito nervuras em um caminhão, pode-se reduzir entorno de 4,7% o peso do freio com esta modificação.

Este estudo se mostrou viável ao se visualizar a aplicação do produto e seu potencial pouco explorado ao longo dos anos. A ferramenta MEF se mostrou de extrema importância e válida para as análises comparativas entre a peça atual e as peças propostas, demonstrando como a aplicação da engenharia em componentes, mesmo quando bem consolidados, é válida.

Os aços SAE 4140 e SAE 4340 possuem limite de escoamento superior em relação ao aço SAE 1030 modificado, proporcionando redução da espessura da nervura em função de seus elementos de liga, o que propiciam também maior temperabilidade.

O aço AC 60, também possui um elevado teor de carbono maior que o atual garantindo temperabilidade superior, porém os resultados obtidos pelos aços SAE 4140 e SAE 4340 possuem maior resistência e limite de escoamento.

As análises geraram a possibilidade de troca de material e mudança de projeto para nervura de sapata de freio com menor espessura, gerando redução no peso da peça com 6,35mm de espessura, de 20,7% em relação à peça atual e para 5,0mm de espessura, de 37,6% em relação a peça atual.

O aço considerado como provável substituto foi o SAE 4340, devido suas propriedades mecânicas que demonstraram resultados superiores em relação ao atual e aos demais analisados, além do baixo custo de importação.

O potencial de ganhos com a nervura de freio ainda deve ser estudado, além da redução de espessura, a mudança de perfil de projeto é outra forma de se reduzir o peso do componente.

Desta forma é possível reprojeter as nervuras com perfis e espessuras diferentes utilizando diferentes materiais, conforme a necessidade de carga dos veículos.

A grande gama de produtos finais pode gerar um ganho ainda maior se trabalhado com foco em cada necessidade de aplicação, portanto o contínuo estudo das nervuras é sem

dúvidas um grande potencial de mudanças e melhorias para aumentar a eficiência do transporte veicular.

É interessante resaltar que outros aços como os modelos de aços mola SAE 5140 e 5160, que possuem boa soldabilidade e temperabilidade, também possuem boas características mecânicas que poderiam ser exploradas para o componente, nervura de sapata de freio em algumas aplicações se aprovado pelas análises descritas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE**. 4a ed., São Paulo, SP: Érica Ltda, 2006.
- ASM 1, Metals HandBook. **Volume 1 Properties and Selection: Irons Steel and High Performance Alloys**, ASM International, 1993.
- ASM 4, Metals HandBook. **Volume 4 Heat Treating**, ASM International, 1991.
- ASM 6, Metals HandBook. **Volume 6 Welding, Brazing and Solderi**, ASM International, 1993.
- AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto, 2003.
- BERNHART, S. **History Of The Automobile Brake System**. Disponível em: <<http://centurycarseat.danielcadams.com/history-of-the-automobile-brake-system>>. Acesso em 29 ago. 2013.
- CALLISTER, Jr. William D., **Ciência e engenharia de Materiais**. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- CONTRAN, Conselho Nacional de Transito. **Resolução N° 380**, Brasil, 2011.
- DAY, A. J.; SHILON, B.R., **Braking of Road Vehicles**. 1. ed. University of Bradford, 2007.
- JUNIOR, I. B. **Rebites Estruturais de Alta Performance para Chapas e Perfis Metálico**. Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, 2011.
- LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. 2. ed. Warrendale: SAE, 1999.
- MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**, LS&TC, UFRGS, 1996.
- MERITOR, **Normas Internas de Projeto e Fabricação**, USA, 2013.
- NEWCOMB, T. P.; SPURR, R. T. **Braking of Road Veihcles**. London: Principal ResearchOfficers, FerodoLimited, 1967.
- RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK R.; BLACK. M. **Handbook of Induction Heating**. Marcel Dekker, Inc., 2003.
- RUNGE, Peter R.F.; DUARTE, Gilson N., **Lubrificantes nas Indústrias**, TRIBOCONCEPT Edições Técnicas, 1989.
- SANTOS, Roger Lusa. **Diferenças de Desempenho de Freios a Tambor Equipados com Sapatas Fundidas e Estampadas em Ônibus Urbano**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2011.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânico em Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**, São Paulo, Edgard Blücher, 1982.