

Definição De Uma Metodologia Para O Ensaio De Compressão Em Materiais De Atrito

FERNANDO JOSÉ BADIM JÚNIOR¹
GILNEI GARCIA LAFUENTE²
ANDRÉ BREZOLIN³

Data de submissão: 12/07/2021. Data de publicação: 30/08/2021.

RESUMO

O presente trabalho pretende apresentar, através de pesquisa experimental, uma metodologia baseada em ensaio por compressão para ensaiar as sedes dos rebites em lonas de freio a tambor, aplicadas em veículos comerciais. Tendo em vista que as lonas são rebitadas nos patins de freio e, por consequência, submetidas a uma força na região da sede do rebite, fez-se necessário definir um método de ensaio mecânico adequado para avaliar se o material está em conformidade com a finalidade proposta, ou seja, se as propriedades mecânicas das lonas de freio estão adequadas a aplicação de uma força de rebite sem deformar plasticamente ou até mesmo não chegar a ruptura. Para realizar os ensaios, foram selecionadas amostras de materiais com diferentes geometrias de sede do rebite. Durante os ensaios foi possível distinguir que algumas sedes de rebite não contavam com resistência mecânica suficiente para suportar a carga aplicada, sendo necessário o descarte destes dados. Para analisar os resultados foi necessário separá-los em dois grupos: um grupo onde a sede do rebite suportou a carga aplicada e, outro, que cisalhou com uma carga menor. A diferença percentual entre os valores dos módulos de elasticidade na metodologia proposta e os valores padronizados em projeto, foi mínima, evidenciando que o método proposto é válido tanto para o desenvolvimento de novos produtos, quanto à melhoria de produtos existentes.

Palavras-chave: Freios a Tambor. Material de atrito. Rebitagem. Ensaio Mecânico. Ensaio de compressão.

ABSTRACT

The present work intends to present, through experimental research, a methodology based on compression testing to test rivet seat in drum brake linings, applied in commercial vehicles. Having in mind that the linings are riveted on the brake shoes and, consequently, subjected to a compressive strength in the region of the rivet holes, it was necessary to define an

¹Engenheiro Mecânico. Atua como analista de produto. fernando.jose@fras-le.com

² Possui aperfeiçoamento no Programa de Desenvolvimento de Gestores de Negócio pela Fundação Dom Cabral (2009), especialização em Gestão de Pessoas (2007) e especialização em Gestão de Negócios (2006) pela Fundação Getúlio Vargas, além da graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul (2004). Consultor e Professor. Tem experiência nas áreas de Gestão Industrial, Sistemas de Gestão, Qualidade, Desenvolvimento de Processos e Manufatura Enxuta: gilneilafuente@acad.ftec.com.br

³ Graduado em Bacharelado em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul (2001); Mestrado em Materiais pela Universidade de Caxias do Sul (2006); e MBA em Gestão Empresarial pela FGV (2008). Atualmente é Gerente de Projetos na empresa Frás-le S.A e professor no Centro Universitário UNIFTEC: andrebrezolin@gmail.com

appropriate mechanical test method to assess whether the material is in accordance with the proposed purpose, i.e., if the brake linings mechanical properties are adequate to apply a riveting force without plastic deformation or even to failure. To carry out the tests, samples of materials with different rivet seat geometries were selected. During the tests, it was possible to distinguish that some rivet seats did not have sufficient mechanical strength to support the applied load, making necessary to discard the related data. To analyze the results, it was necessary to separate the data into two groups: a group where the rivet seat has had supported the applied load and another group that sheared with a lower load. The percentage difference between the values of the modulus of elasticity in the proposed methodology and the standardized values in the project was minimal, showing that the proposed method is valid both for the development of new products and for the existing products improvement.

Keywords: Drum Brakes. Friction material. Riveting Process. Mechanical Testing. Compression Testing.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos a indústria automotiva vem desenvolvendo veículos mais confortáveis, seguros e potentes, exigindo-se o aprimoramento nos sistemas de freios. O princípio de funcionamento de um sistema de freio é a transformação da energia cinética em calor, resultado da aplicação de uma força durante uma frenagem, na qual envolve velocidades de deslocamento de um veículo, forças aplicadas por componentes mecânicos e materiais de fricção montados no sistema.

A mistura de diferentes materiais de atrito tem por objetivo atender a requisitos que estão associados ao materiais de fricção, como eficiência de frenagem, ausência de ruído e resistências térmicas e mecânicas (MENETRIER, 2006, p. 4).

Os materiais de atrito também devem atender os requisitos especificados em normas nacionais e internacionais de segurança veicular, que devem ser comprovadas através de ensaios e testes de laboratórios.

Para o desenvolvimento de um material de fricção, ou aprimoramento de algum material já existente, é fundamental que o engenheiro responsável tenha conhecimento dos componentes e processos químicos que estão presentes ou serão utilizados, bem como das solicitações mecânicas envolvidas no processo de frenagem, além de aspectos construtivos de outros componentes utilizados em um sistema de freio, como é o caso do processo de rebitagem, utilizado na fixação de lonas aos patins de freio responsável pela integridade do sistema de freio a tambor (PEREIRA, 2014, p. 1).

O processo de rebitagem é um dos mais comuns e mais utilizados métodos para fixar componentes diferentes, caracterizando-se pela alta produtividade, baixo custo de

processamento e eficiência da junta rebitada. É importante que a junta rebitada seja analisada, estimada e controlada para garantir a integridade das peças que compõe a junta rebitada (ZHANG; CHENG; LI, 2010, p. 1).

Conforme abordado por Lombriller (2002), ainda há muitas pesquisas sendo feitas com relação aos materiais de atrito, porém as empresas fabricantes de materiais de fricção ainda são detentoras de grande parte do conhecimento adquirido, tornando a literatura escassa com relação a esse tema. Por conta disso, torna-se evidente a importância no desenvolvimento de trabalhos relacionados a materiais de atrito.

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para o ensaio de compressão da resistência da sede do rebite de lonas de freio, quando esta sofrer uma força de compressão similar ao que acontece no processo de rebitagem da lona na sapata de freio. Esse ensaio, conduzido em uma máquina de ensaio universal, com parâmetros controlados, possibilita identificar as curvas de tensão x deformação do material de atrito quando submetido a cargas de compressão.

Considerando-se que o tema é amplo, faz-se necessário delimitar o trabalho, especificando as etapas para ensaiar e comparar as diferentes geometrias e materiais nas sedes de rebite, visando identificar o módulo de elasticidade para cada um dos materiais ensaiados, atualmente em produção, com a identificação da carga máxima de compressão dentro do regime elástico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Freios são dispositivos que possuem a função de reduzir a velocidade ou impedir o movimento relativo dos corpos sobre os quais atuam, retirando energia de um sistema. A desaceleração de um veículo envolve a transformação de energia cinética e/ou potencial em energia térmica (LIMPERT, 1999, p. 11).

Usualmente, na indústria veicular, são utilizados dois tipos de sistemas de freio, chamados de freio a disco e freio a tambor. Os dois sistemas utilizam das forças de atrito como parâmetro físico para manter ou reduzir a velocidade do veículo (SCLAR, 2015). Segundo Rabinowicz (1965), o atrito é definido como a resistência ao movimento entre duas superfícies em contato. No sistema de freio a tambor, o atrito ocorre entre o raio interno do tambor e as lonas presentes nas sapatas de freio.

Conforme abordado por Limpert (1999, p. 37), os freios a tambor são compostos por um sistema onde as sapatas são empurradas, através da rotação de um eixo, acionado por um



atuador, na direção radial contra o tambor de freio, que consiste em um cilindro metálico localizado na região externa ao sistema de freio, fixos nas extremidades dos eixos dos veículos.

Para que um sistema de freio seja corretamente dimensionado, é necessário identificar o torque máximo de frenagem, pois é a condição mais crítica do sistema de freio e serve de parâmetro para o desenvolvimento de todo o projeto. Para suportar o torque máximo de frenagem e impedir o deslocamento das lonas de freio sobre a sapata, é utilizado o processo de rebiteagem, que tem por objetivo fixar as lonas de freio no patim, por meio de rebites metálicos, de maneira que suportem os esforços de frenagem oriundos do sistema de freio. Além dessa função, o processo de rebiteagem não pode comprometer a integridade física das lonas de freio, através da força de compressão gerada pela fixação do rebite.

O processo de rebiteagem é complexo devido a inúmeros fatores envolvidos sendo, entre eles, o comportamento termomecânico da junta de contato entre o patim de freio e o material de atrito, o comportamento não elástico dos materiais e as condições de contato durante o processo de atrito entre a lona e o tambor de freio (FAISHAL, 2006).

Para realizar o processo de rebiteagem são utilizadas máquinas específicas, chamadas de rebiteadeiras. Essas máquinas têm a função de deformar o rebite de modo que as lonas de freio fiquem fixas nas sapatas. A força atuante necessária para manter as lonas solidárias ao sistema de freio é a de compressão.

As lonas de freio são responsáveis pela geração de atrito com o tambor de freio, fazendo com que o veículo diminua a velocidade ou pare totalmente. Elas são fabricadas de acordo com a necessidade de cada veículo.

O material utilizado para a fabricação das lonas de freio são chamados de materiais de fricção e, segundo Menetrier (2006), são considerados elementos chaves do sistema de freio de um veículo, sendo desenvolvidos para manter a força de fricção estável, dureza e uma boa resistência ao desgaste nas mais variadas condições de uso.

Para atender as variações de uso são utilizados cinco tipos principais de componentes na fabricação dos materiais de atrito, sendo eles: fibras, ligantes, cargas minerais e lubrificantes. Cada um desses componentes tem um papel fundamental na caracterização física das lonas de freio para atender as solicitações de frenagem.

Os materiais de atrito possuem inúmeras características físicas, nas quais podem ser citadas: condutividade térmica, resistência ao choque térmico, resistência à tração, rigidez, compressibilidade e resistência à compressão; sendo esta última, a característica que esse

trabalho irá abordar.

De acordo com Melconian (2000, p. 63), “A carga normal F, que atua na peça, origina nesta uma tensão normal que é determinada através da relação entre a intensidade da carga aplicada, e a área da secção transversal da peça”. Nas lonas de freio, a tensão normal ocorre na área onde a cabeça do rebite é apoiada na lona de freio e exerce a força de compressão no momento da rebitação. Na Figura 1 é vista a lona de freio furada.

Pode ser verificada a tensão normal pela Equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

σ - Tensão normal [N/mm²].

F - Força ou carga normal [N].

A - Área da sede da lona de freio [mm²].

Conforme pode ser visto em Nicolodi e Nicolodi (2013, p. 135), a área de uma coroa, como é o caso da sede do rebite, identificada na Figura 17, é calculada pela Equação 2:

$$A_{coroa} = \pi(R^2 - r^2) \quad (2)$$

Onde:

A_{coroa} - Área da coroa [mm²].

π - PI.

R^2 - Raio maior do diâmetro [mm].

r^2 - Raio menor do diâmetro [mm].

Figura 1 - Detalhe da área da coroa do furo da lona



Fonte: Elaborado pelo autor.

No momento da rebitagem ocorre uma deformação na sede do rebite devido a carga axial aplicada sobre a área da coroa. O conceito básico de deformação definido por Hibbeler (2004) é, a alteração no comprimento inicial dos segmentos de uma reta a também na mudança dos ângulos entre eles. Ele ainda descreve que “o alongamento ou a contração de um segmento de reta por unidade de comprimento é denominado deformação normal”. A deformação é calculada pela Equação 3.

$$\varepsilon_c = \frac{L_o - L_f}{L_o} \quad (3)$$

Onde:

ε_c - Deformação convencional.

L_o - Comprimento inicial da reta [mm].

L_f - Comprimento final da reta [mm].

Os materiais de fricção enquadram-se na categoria de material frágil, pois não apresentam a fase elástica no diagrama tensão x deformação, passando da fase elástica para o rompimento, de forma abrupta. Os materiais frágeis têm por característica pouca deformação antes de se romper (NASH, 1982).

Devido ao fato dos materiais de atrito apresentarem a fase elástica, torna-se fundamental determinar o módulo de elasticidade desses materiais, uma vez que eles são fatores fundamentais quando vistos do ponto do processo de rebitagem.

O módulo de elasticidade, segundo Callister (2002), é uma constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação e está presente dentro da fase elástica do material. O módulo de elasticidade é calculado pela Equação 4.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Onde:

E - Módulo de elasticidade.

σ - Tensão [MPa].

ε - Deformação [mm].

O ensaio de compressão é utilizado quando se deseja conhecer a resistência de um material submetido a forças compressivas. Essas forças podem deformar o material parcialmente ou completamente.

Conforme Hibbeler (2004), muitas propriedades inerentes ao ensaio de compressão

são possíveis de serem determinadas e uma delas é a relação entre a carga aplicada e a deformação normal média.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme descrito por Gil (2008), o trabalho realizado enquadra-se em pesquisa experimental, pois apresenta-se como método adequado de pesquisa científica, que consiste na determinação do objeto de estudo, das variáveis que podem influenciar os resultados e na definição das formas de controle que serão necessárias para garantir a melhor acuracidade dos resultados gerados nos experimentos científicos.

As variáveis abordadas no trabalho estão relacionadas a três modelos de lonas de freio distintas, onde cada uma apresenta seus dimensionais e materiais de atrito diferentes, com características químicas e mecânicas próprias.

Na realização deste trabalho foram selecionados dois *designs* de furos na sede de rebite, devido as diferentes concentrações de tensão em cada uma das geometrias dos furos. Em adição, foram selecionados materiais de atrito diferentes, já que há características mecânicas distintas entre eles. Além disso, foi identificada a carga máxima de compressão dentro do regime elástico em cada material de atrito e furos selecionados. Com os dados obtidos nos testes realizados foi feito o cálculo do módulo de elasticidade de cada material de atrito ensaiado. Para iniciar os ensaios de compressão, foi utilizado como base um ensaio já existente na empresa.

Dentre as propriedades dos materiais de atrito, a característica mecânica da resistência a compressão foi abordada neste trabalho através do ensaio de compressão da sede do rebite em lonas de freio.

Para realizar o trabalho, foi necessário o envolvimento de duas áreas na empresa, a engenharia de aplicação, que é responsável pelo desenvolvimento, estudo, análise e melhoria de produtos, e o laboratório físico da empresa, responsável pelos recursos utilizados no ensaio de compressão da sede dos rebites nas lonas de freio.

A coleta de dados para a realização do trabalho iniciou-se pelo *Enterprise Resource Planning* - ERP, sistema de gestão empresarial utilizado pela empresa, de onde foram identificados os dados considerados necessários para a realização do trabalho, sendo eles: as dimensões das lonas de freio submetidas ao ensaio de compressão e os materiais de atrito utilizados em cada lona de freio, bem como as características mecânicas de cada um deles,

sendo estes de domínio da empresa.

As lonas de freio foram separadas por geometrias da sede de rebites e pelos materiais de atrito utilizados para a fabricação. Logo em seguida, as lonas de freio foram identificadas pelas letras “A”, “B” e “C” e os materiais de atrito identificados pelos números 1, 2, 3, 4, 5 e 6. As lonas de freio do tipo A são formadas por dois tipos de jogos diferentes. Os primeiros jogos de peças são compostos por lonas que são utilizadas em freios com sistema de acionamento do tipo “S” came e possuem dois tipos de peças distintas, a ancor e a came. As lonas do tipo “A” são apresentadas na Figura 2.

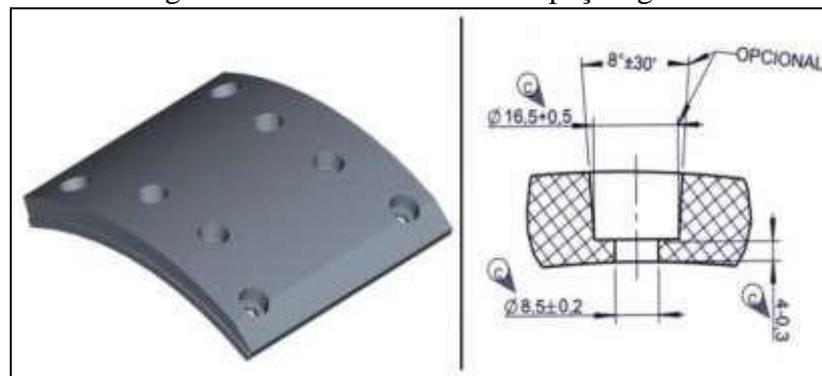
Figura 2 - Lona de freio A com ancor e came



Fonte: Elaborado pelo autor.

As lonas de freio do tipo B, conforme Figura 3, possuem todas as lonas de freio iguais. Contudo, possuem os furos com as mesmas medidas das peças A.

Figura 3 - Lona de freio A com peças iguais



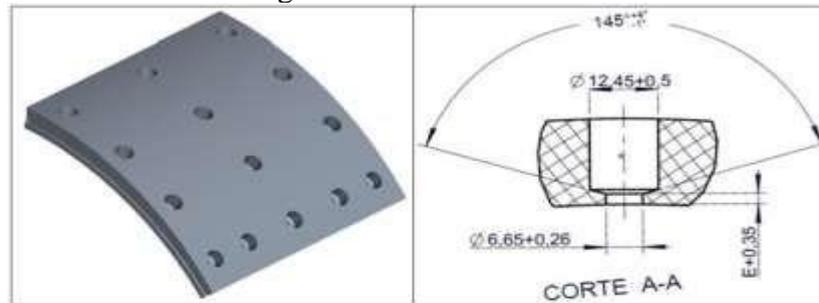
Fonte: Elaborado pelo autor.

As lonas de freio do tipo C também são utilizadas em sistemas de freio com acionamento por cilindros pneumáticos, ocorrendo simultaneamente entre as peças superiores e inferiores do sistema de freio, assim todas as lonas de freio tocam o raio interno do tambor

simultaneamente.

As lonas de freio “C” também são formadas por peças iguais em todo o sistema de freio, porém os furos possuem dimensionamentos diferentes, além de possuir um ângulo de 145° localizado na sede do furo, conforme visto na Figura 4.

Figura 4 - Lona de freio C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os materiais de atrito ensaiados possuíam as características mecânicas informadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos materiais de atrito

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)
1	2829	2,22
2	1648	1,91
3	1990	1,95
4	2382	1,90
5	2321	2,00
6	Sem informação	Sem informação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a identificação das lonas de freio e dos materiais de atrito utilizados para produção das mesmas, as amostras foram classificadas de acordo com as seguintes configurações:

- a) A _ 1 = Lona de freio A e material de atrito 1;
- b) A _ 4 = Lona de freio A e material de atrito 4;
- c) A _ 6 = Lona de freio A e material de atrito 6 (esse material de atrito é desconhecido, pois foi fabricado por outra empresa);
- d) B _ 3 = Lona de freio B e material de atrito 3;
- e) B _ 5 = Lona de freio B e material de atrito 5;
- f) C _ 2 = Lona de freio C e material de atrito 2;



g) C _ 5 = Lona de freio C e material de atrito 5.

Além das lonas de produção, foi possível realizar um ensaio de compressão em uma lona de freio de uma empresa concorrente. Essa lona de freio é similar ao do tipo A, porém com o material de atrito desconhecido. Sendo assim, foi possível comparar os resultados dos ensaios de compressão entre as lonas de freio fabricados pela empresa, na qual o trabalho foi realizado, e a amostra do concorrente.

O ensaio de compressão utilizado pela empresa é uma exigência para determinados clientes que desejam conhecer as forças de ruptura na sede da lona do rebite. Para realizar esse ensaio são utilizados dispositivos que simulam a força de rebitagem e o assentamento da lona na sapata de freio, além da máquina de ensaio universal que simula a força aplicada no processo de rebitagem.

Para simular o rebite, é utilizado um dispositivo chamado de punção, na qual é fixada na placa móvel da máquina. Para simular a sapata de freio, é utilizado um dispositivo chamado de base, que é preso na placa fixa da máquina de ensaios. A máquina de ensaio universal é responsável pela aplicação da força axial de compressão, a 50 kN/s, conforme estabelecido por estudo interno já realizado pela empresa.

Com a definição das lonas de freio e seus respectivos materiais de atrito, além dos dispositivos e máquinas que serão utilizados, foram identificadas todas as lonas de freio com seus respectivos furos para que, posteriormente, seja possível o rastreamento das informações a serem coletadas no ensaio, em cada furo específico.

Todos os furos das lonas de freio foram medidos com a utilização de um paquímetro. As medições foram feitas nos diâmetros maiores e menores dos furos e na espessura dos mesmos.

Após a coleta dos dados, deu-se início aos ensaios de compressão, que foram executados por operadores devidamente treinados pela empresa e acompanhados pelo autor do trabalho.

O software utilizado pela máquina forneceu os seguintes dados:

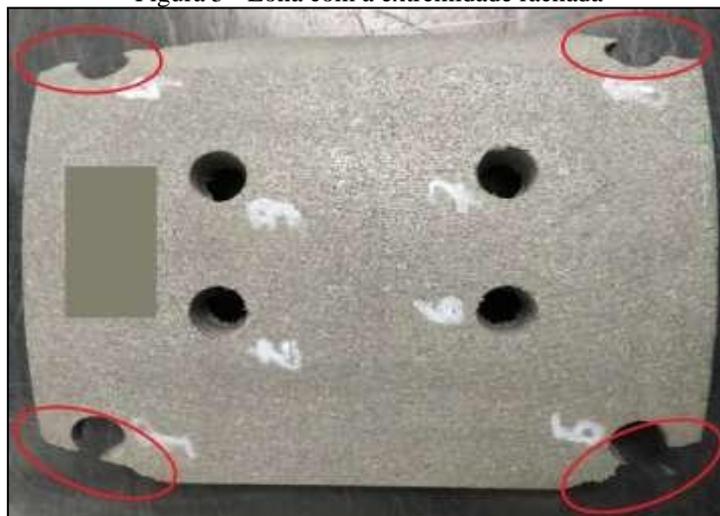
- a) Carga aplicada na sede da lona até a ruptura, em kN;
- b) Deslocamento do punção, em mm;
- c) Módulo de compressão, em MPa;
- d) Área que recebe a carga, em mm²;
- e) Tensão à compressão, em MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos ensaios iniciou-se pela verificação dos tipos de fratura que ocorreram na área da coroa dos furos das lonas de freio. Percebeu-se que nos furos próximos as extremidades das lonas houve a fratura do material no sentido transversal do furo. Esse tipo de fratura é decorrente das tensões de tração localizadas no furo e da pouca área para suportar essa tensão. É possível fazer essa identificação através da Figura 5.

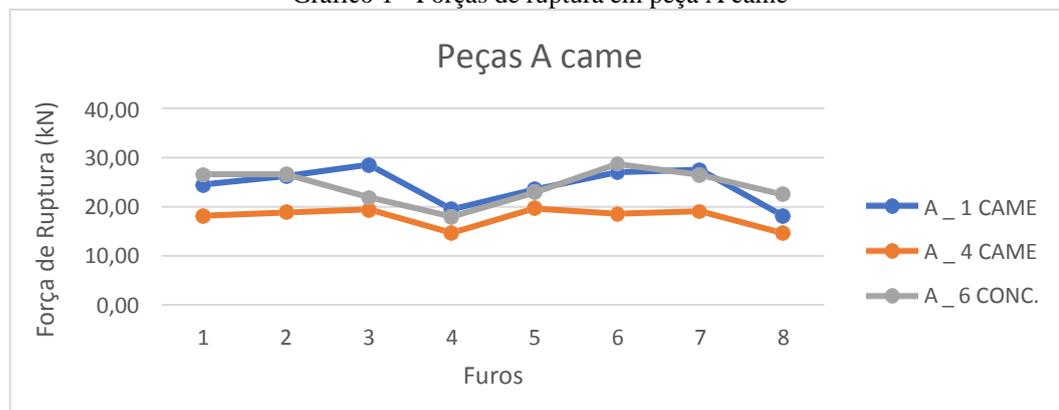
Foi possível identificar que a força de ruptura na coroa varia de um furo para outro. Uma possível explicação para essa ruptura está relacionada com o fato do material de atrito não possuir uma estrutura cristalina definida, devido a mistura de inúmeros materiais distintos, o que o torna um material amorfo. Para o mesmo modelo de lona e furos foram encontradas forças de rupturas diferentes, como podem ser vistas nos Gráficos 1, 2, 3 e 4.

Figura 5 - Lona com a extremidade rachada



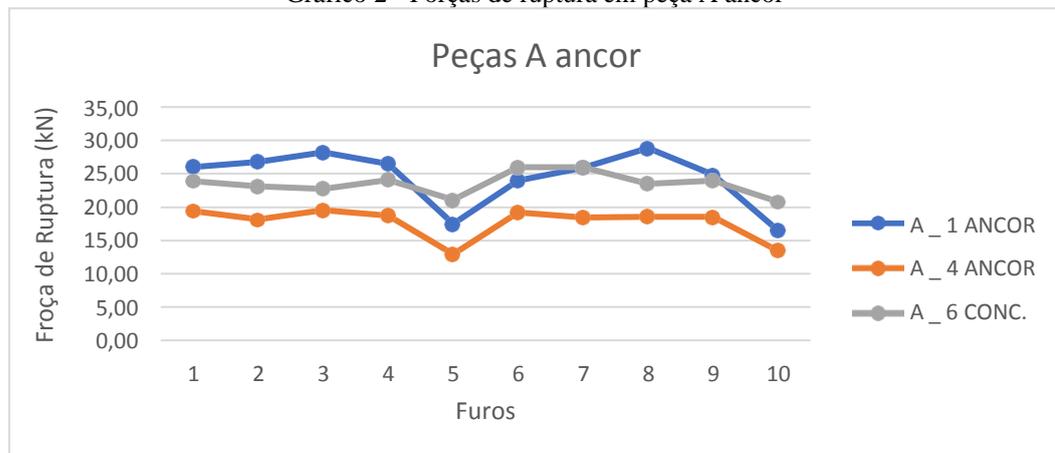
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 1 - Forças de ruptura em peça A came



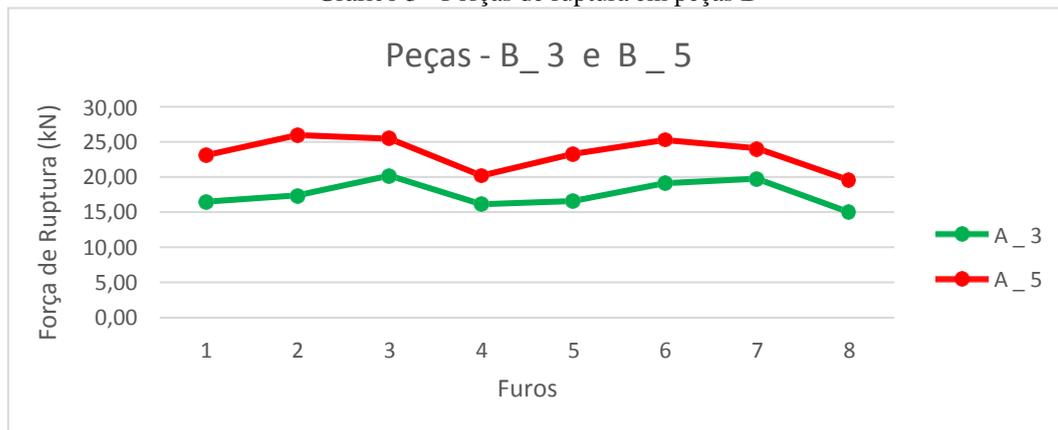
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - Forças de ruptura em peça A ancor



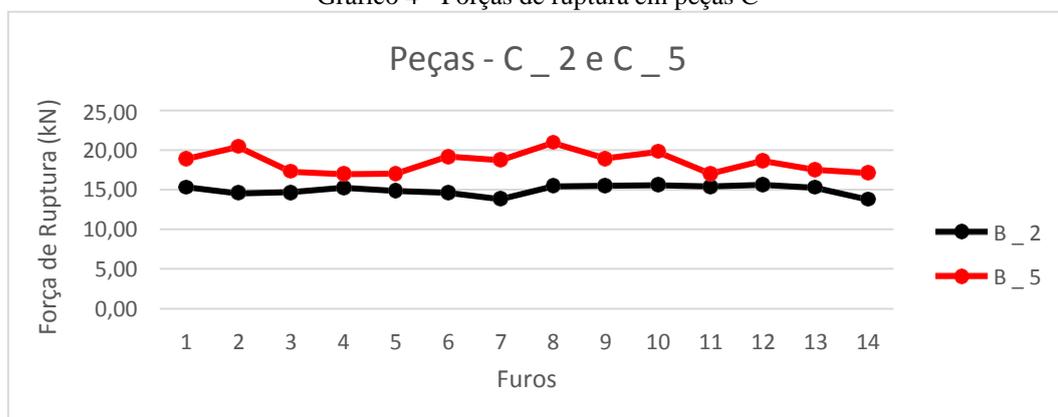
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Forças de ruptura em peças B



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 - Forças de ruptura em peças C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando-se o mesmo material de atrito, utilizado nas lonas B_5 e C_5, é possível identificar que a força necessária para que ocorra a ruptura na sede do rebite é menor na lona com menor área de coroa, ou seja, a lona C_5. Essa constatação pode ser

confirmada, também, através da Equação 1, onde a força é proporcional a área, ou seja, quanto menor a área menor será a força necessária para ocorrer a deformação.

Através dos dados gerados pelo software da máquina universal de ensaio de tração, foi possível realizar o cálculo dos módulos de elasticidade em cada furo de todas as lonas ensaiadas. Os furos localizados nas extremidades das lonas de freio, que romperam por tração, não foram considerados nestes cálculos.

Após serem calculados os módulos de elasticidade de cada furo separadamente, foi calculada a média dos valores encontrados para comparar com o valor fornecido pela empresa. Também foi identificada a diferença entre os valores informados e os calculados, além dos valores máximos e mínimos de cada material. Os valores calculados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos módulos de elasticidade

Lona	Empresa (MPa)	Calculado (MPa)	Diferença (MPa)	Diferença (%)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
A_1	2829	2725	104	3,68	2334	3112
A_4	2382	2182	200	8,41	1657	2540
A_6	-	1965	-	-	1793	2186
B_3	1990	1959	31	1,57	1694	2246
B_5	2321	2345	24	1,04	2038	2765
C_2	1648	1679	31	1,85	1341	2092
C_5	2321	2338	17	0,71	1629	2739

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de se estabelecer uma metodologia para o ensaio de compressão nas sedes dos rebites e levando-se em consideração os resultados dos ensaios realizados e as análises feitas, chegou-se a seguinte proposição de metodologia:

SELEÇÃO DAS PEÇAS:

Coletar a quantidade de peças necessárias na utilização de no mínimo três sistemas de freio completo. As peças devem ser retiradas da linha de produção e encaminhadas para o recebimento do laboratório.

RECEBIMENTO DAS PEÇAS:

As lonas encaminhadas para o ensaio de compressão devem ser entregues na sala de recebimento do laboratório. Os materiais a serem ensaiados devem ter os lotes de fabricação e identificações específicas registradas para que seja possível fazer a rastreabilidade do material

ensaiado.

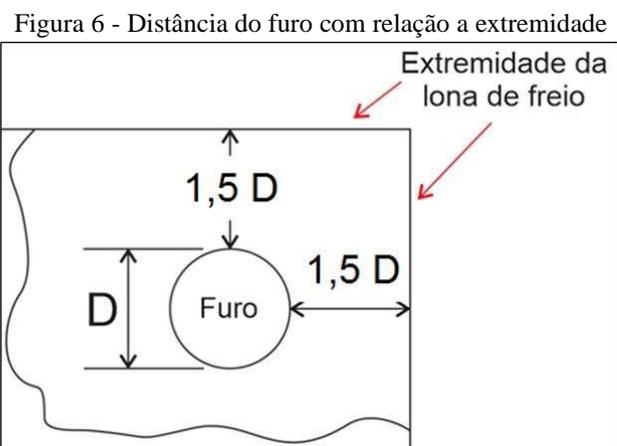
IDENTIFICAÇÃO DAS PEÇAS E FUROS DAS LONAS:

Todas as peças e seus respectivos furos devem ser identificados. Cada lona de freio deve ser identificada de maneira distinta. É importante seguir sempre a mesma sequência de identificação dos furos.

MEDIÇÃO DOS FUROS:

Todos os furos que serão submetidos ao ensaio devem ser medidos com paquímetro. Deve-se medir o diâmetro externo, diâmetro interno e espessura; a espessura deve ser medida utilizando-se do dispositivo “base” para que seja possível alinhar o paquímetro a 90° com relação ao raio da lona. As medições devem ser registradas no software da máquina que executa o ensaio.

Observação: Os furos da lona, que estiverem a uma distância menor $1,5D$ em relação a extremidade da lona de freio, não devem ser identificados e ensaiados. A visualização da identificação da posição dos furos em relação a extremidade é apresentada na Figura 6.

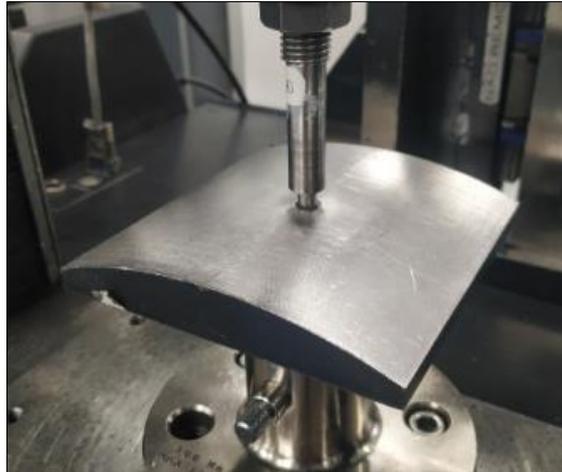


Fonte: Elaborado pelo autor.

PREPARAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO:

Montar os dispositivos na máquina de ensaio universal, de acordo com a Figura 7, onde as peças que serão ensaiadas. O dispositivo da base deve ter o mesmo raio que o raio interno da lona de freio, e o punção deve ser compatível com os diâmetros dos furos das lonas. A base é montada na placa fixa da máquina e o punção na placa móvel, conforme padrão já utilizado no laboratório.

Figura 7 - Dispositivo para realização do ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve-se baixar a placa móvel da máquina no modo manual e verificar se o punção está centralizado com o furo da base. Caso não estiver, fazer a centralização antes de começar o ensaio.

Selecionar o programa responsável pelo ensaio de compressão na sede dos rebites de lonas de freio. O mesmo está instalado na máquina.

Preencher os campos do sistema correspondentes ao modelo da lona, o material de atrito e as dimensões dos furos.

POSICIONAMENTO DA LONA:

Deve-se posicionar a lona de freio sobre o dispositivo base de modo que o furo a ser ensaiado fique centralizado com o furo do dispositivo, e que o raio da lona e do dispositivo fiquem bem assentados.

CARGA AXIAL:

Antes de iniciar o ensaio, deve-se zerar o posicionamento da placa móvel.

Descer o punção até que o diâmetro menor entre o furo da lona e o diâmetro maior encontre na área da coroa do furo da lona de freio.

Aplicar a carga de compressão, que é feita pelo botão localizado no painel da máquina e que já está configurada para uma força de 50 kN/s.

PADRÃO DE ACEITAÇÃO:

Após a realização do ensaio, coletar o valor da força de ruptura e comparar com os

valores padronizados para o material de atrito ensaiado. Para o material de atrito estar dentro do padrão aceitável, a força máxima de ruptura da sede do furos das lonas de freio não pode ultrapassar os valores informados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valor da força de ruptura em função do material de atrito

Material de Atrito	Força Mínima de Ruptura (kN)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	20,2	2829
3	14,3	1990
4	12,5	2382
5	18,8	2321
2	13,7	1648
5	18,9	2321

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização desse trabalho foi possível estabelecer uma metodologia para análise de dados obtidos através do ensaio de compressão nas sedes dos rebites de lonas de freio, utilizando-se de embasamento teórico aplicado em ensaios de compressão em máquina universal de ensaio de tração.

Baseado nos ensaios realizados e os comparando-os com dados históricos de ensaios realizados pela empresa, foi possível estabelecer uma razoável correlação entre cálculos teóricos e práticos aos modelos que a empresa possuía.

Com esse estudo foi possível identificar as forças de ruptura nas sedes dos rebites e os módulos de elasticidade para três modelos de lonas de freio, sendo que dois deles apresentam a mesma área de coroa na sede do rebite. Também foi possível utilizar dois materiais de atrito distintos, além de um material de atrito de concorrente para fins de comparação.

Identificou-se que a força necessária para deformar a sede do rebite é menor nos furos próximos as extremidades da lona de freio. Isso ocorre, pois há menos área entre o diâmetro externo do furo e a extremidade da lona de freio e a conseqüente ruptura do material de atrito no sentido perpendicular à aplicação da força. Nos furos que apresentam uma área de coroa menor, foi necessário um módulo de força de compressão menor para deformar o furo da lona de freio.

Os módulos de elasticidade encontrados apresentam variações nos diferentes



materiais de atrito submetidos ao ensaio, pois para cada tipo de material de atrito são utilizadas diferentes matérias primas, as quais apresentam características mecânicas distintas. Nos materiais de atrito com módulo de elasticidade menor, há uma concentração maior de materiais metálicos, o que torna o material de atrito mais dúctil.

A partir da utilização dessa metodologia, será possível fazer a seleção e aprovação de todo e qualquer material de atrito que a empresa venha a desenvolver, bem como o desenvolvimento de novos modelos de lona de freio ou ensaiar itens que já estejam em produção. Ainda, será possível criar um banco de dados relacionando materiais de atrito com a área da coroa, as forças de ruptura e os módulos de elasticidade. Com a estruturação do banco de dados será possível utilizá-los como parâmetros para o desenvolvimento de novos produtos e na melhoria de produtos existentes.

Sugere-se que, para lonas de freio que apresentem problemas relacionados a fixação em patins de freio, seja realizada uma análise com a utilização da metodologia proposta e, caso seja possível, efetuar a alteração no posicionamento dos furos da lona para que fiquem mais distantes das extremidades, podendo assim aumentar a força de rebiteagem sem prejudicar a estrutura da lona e garantir a melhor fixação da lona de freio no patim.

Como observado, o campo de estudos de materiais de atrito ainda tem muito por ser explorado e, como consequência disso, o presente trabalho traz a luz alguns temas de trabalhos de pesquisa futuros, os quais não foram abordados no presente trabalho, como:

- a) Analisar as diferentes formas de rebite e sua influência sobre a deformação nos furos das lonas de freio;
- b) Identificação das distâncias dos furos com relação as extremidades das lonas de freio, de modo que não ocorram deformações por tração durante o ensaio de compressão;
- c) Analisar se as forças de compressão líquida do processo de rebiteagem são ideais para suportar as forças impostas sobre o sistema de freio;
- d) Realizar um estudo comparativo entre as forças de compressão líquidas, obtidas pela metodologia definida no presente estudo, e o desempenho no campo. Desta forma, poder-se-ia criar um teste de laboratório para confrontar o resultado do ensaio e as respectivas solicitações que as lonas de freios sofrem durante a aplicação durante o uso.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D. Jr, **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5. ed. LTC, 2002.

- FAISHAL, Kazi. **Impact of Riveting Sequence, Pitch and Gap between Sheets on Quality of Riveted Lap Joints**. Bangladesh: University of Engineering and Technology, 2006.
- GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- HIBBELER, Russel. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- LIMPERT, Rudolf. **Brake Design and Safety**. 2. ed. New York, 1999.
- LOMBRILLER, Silvia Faria. **Análise térmica e dinâmica do sistema de freio a disco de veículos comerciais pesados**. São Carlos: USP, 2002
- MELCONIAN, Sarkid. **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**. 11. ed. São Paulo: Érica, 2000.
- MENETRIER, Ademir Reus. **Estudo de variáveis de composição e processo para controle da compressibilidade**. Caxias do Sul: UCS, 2006
- NASH, William Arthur. **Resistência dos materiais**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.
- NICOLODI, Josiane Elias; NICOLODI, Roberto. **Geometria Analítica**. Indaial: Uniasselvi, 2013.
- PEREIRA, Carlos Henrique Selle. **Modelamento Matemático Simplificado do Processo de Fixação de Materiais de Fricção por Rebitagem**. Porto Alegre: UFRGS, 2014.
- RABINOWICZ, Ernest. **Friction and Wear of Materials**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1965
- SCLAR, Deanna. **Mecânica de Automóveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2015.
- ZHANG, Kaifu; CHENG, Hui; LI, Yuan. **Riveting Process Modeling and Simulating for Deformation Analysis of Aircraft's Thin-walled Sheet-metal Parts**. China: Chinese Journal of Aeronautics, 2010.