

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PNEUMÁTICA PARA TESTE E ANÁLISE DO SISTEMAS DE FREIO EM SEMIRREBOQUES: ENFOQUE EM SEGURANÇA E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

MOTEKA. CAMINSKI, Wilson¹

TRAIANO. Denner²

RESUMO: O transporte de cargas no Brasil desempenha um papel crucial na economia, caminhões e semirreboques representam aproximadamente 65% do volume total de cargas. Neste contexto, a segurança em veículos pesados é um fator crítico, especialmente no que diz respeito aos sistemas de freio. Este estudo analisa os sistemas de freio aplicados em semirreboques e propõe o desenvolvimento de um painel pneumático para simulação do funcionamento destes sistemas. A simulação visa proporcionar uma compreensão prática e inovadora dos processos dinâmicos envolvidos, destacando a importância da manutenção preventiva para a segurança nas estradas. Os resultados indicam que a utilização do painel pneumático contribui significativamente para o entendimento das operações de freio, oferecendo uma ferramenta eficaz para a análise e aprimoramento desses sistemas.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de Freio, Bancada Pneumática, Semirreboques.

ABSTRACT: The transportation of goods in Brazil plays a crucial role in the economy, with trucks and semi-trailers accounting for approximately 65% of the total cargo volume. In this context, safety in heavy vehicles is a critical factor, especially regarding braking systems. This study analyzes the braking systems applied in semi-trailers and proposes the development of a pneumatic panel for simulating the operation of these systems. The simulation aims to provide a practical and innovative understanding of the dynamic processes involved, highlighting the importance of preventive maintenance for road safety. The results indicate that the use of the pneumatic panel significantly contributes to the understanding of brake operations, offering an effective tool for analyzing and improving these systems.

KEYWORDS: Brake System, Pneumatic Bench, Semi-trailers.

1 INTRODUÇÃO

O transporte de cargas no Brasil desempenha um papel importante na atividade econômica, concentrando-se em caminhões e semirreboques, representando aproximadamente 65% do volume de cargas (MOREIRA *et al.*, 2018). Nesse cenário a segurança em veículos pesados surge como um fator crítico, dada a complexidade do funcionamento correto desses sistemas em equipamentos rodoviários (FERRAZ *et al.*, 2023).

As falhas nos sistemas de freio dos caminhões representam um problema afetando diretamente a segurança nas rodovias. Estatísticas da Polícia Rodoviária Federal indicam que 27% dos veículos desse tipo apresentam algum tipo de defeito

¹ Graduando de Engenharia Mecânica no Centro Universitário Campo Real. engm wilsonmoteka@camporeal.edu.br

² Mestrado em Engenharia Mecânica. Professor no Centro Universitário do Campo Real. prof_dennertraianol@camporeal.edu.br

nos freios. Durante operações de fiscalização, 124 caminhões foram verificados, revelando que 34 deles apresentaram deficiência no sistema de freios. Esse percentual destaca a urgência em abordar e solucionar as questões relacionadas à manutenção desses veículos de acordo com o Ministério da Justiça e Segurança Pública (2022).

O sistema de freios de um semirreboque conta com elementos como: válvulas, câmaras de freio e sapatas que desempenham papéis específicos e interdependentes. As válvulas têm por função regular a pressão do freio, assim como as câmaras de freio convertem a pressão do ar em força mecânica, dessa forma as sapatas realizam o procedimento de frenagem. A complexidade do sistema aumenta com a integração do sistema antibloqueio (ABS), desenvolvido com a finalidade de reduzir e evitar o travamento das rodas em condições adversas, proporcionando maior controle e estabilidade do equipamento (RUESGA, 2011).

Segundo o Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (2011), tornou-se obrigatório por meio da resolução Nº 380 a utilização de sistemas ABS em semirreboques partindo do ano de 2014. Devido a essa regulamentação a indústria de caminhões, iniciou o procedimento de avanço tecnológico e padronização de frota, permitindo a elevação da segurança veicular contando como resultado a redução de acidentes.

As regulamentações vigentes proporcionaram um avanço no segmento de fabricação de novos semirreboques, porém, é importante ressaltar que a frota anterior ao marco de regulamentação em 2014 não possui o sistema de ABS integrado nos seus mecanismos, ou seja, esse sistema precisa de maior cuidado e maiores manutenções preventivas e corretivas para garantir a segurança deste equipamento (CONTRAN, 2011).

De acordo com Alves (2020), a manutenção preventiva se torna uma solução essencial para garantir o funcionamento eficiente e seguro desses sistemas de freio. Para isso é necessário inspeções constantes realizando a substituição de peças com desgaste e ajustes manuais em componentes.

Dessa forma esse trabalho tem proposta de desenvolver uma bancada pneumática simuladora do sistema de freios de semirreboques, que permita reproduzir de forma prática as operações de frenagem e condições reais de funcionamento simuladas. A bancada será projetada para facilitar a compreensão dos processos dinâmicos do sistema de freios e possibilitar a realização de testes de eficiência e

segurança, contribuindo para uma análise detalhada de desempenho e dos componentes pneumáticos envolvidos.

Este estudo justifica a urgência em abordar os desafios relacionados aos sistemas de freios em caminhões e semirreboques, conforme indicado por dados alarmantes da Polícia Rodoviária Federal. O objetivo desse procedimento científico foi realizar uma análise do sistema de freio aplicados em semirreboques e desenvolvimento de um conjunto prático para simular os processos dinâmicos que ocorrem no cotidiano desses equipamentos. Dessa forma é destacado a importância desse sistema para a segurança dos ocupantes do veículo, integridade da carga transportada e dos demais usuários da rodovia, a eficiência e a validação do sistema está diretamente vinculada ao funcionamento correto dos seus componentes.

2 METODOLOGIA

Esta seção descreve os métodos utilizados para a realização do estudo sobre os sistemas de freio em semirreboques, com ênfase na segurança e eficiência operacional. O projeto foi desenvolvido com base em uma análise detalhada da frota de semirreboques no Brasil, levando em consideração a idade média dos veículos, a presença ou ausência do sistema ABS, e as estatísticas de acidentes relacionadas a falhas no sistema.

Com base nos dados levantados, foram definidas as etapas de projeto e construção de uma bancada pneumática, capaz de reproduzir o funcionamento de sistemas de freio em semirreboques. Este modelo não apenas permite a análise detalhada do mecanismo de frenagem, mas também possibilita a realização de testes práticos para coletar dados críticos sobre desempenho, segurança e eficiência do sistema.

O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra as principais etapas deste desenvolvimento, desde o levantamento inicial de informações até a realização de testes na bancada construída. Ele serve como uma referência visual para compreender o fluxo lógico das atividades, destacando os passos seguidos para atingir os objetivos da pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma



Fonte: Autoria própria (2024)

Para atingir os objetivos propostos, foi realizada uma pesquisa documental em fontes oficiais e relatórios de órgãos de trânsito, além da análise de estudos acadêmicos e técnicos sobre sistemas de frenagem. A coleta de dados inclui informações sobre a idade da frota, o número de acidentes e as falhas identificadas nos freios. No entanto, é importante ressaltar que a idade do veículo é apenas um dos fatores que podem influenciar a segurança. Outros elementos, como a qualidade da

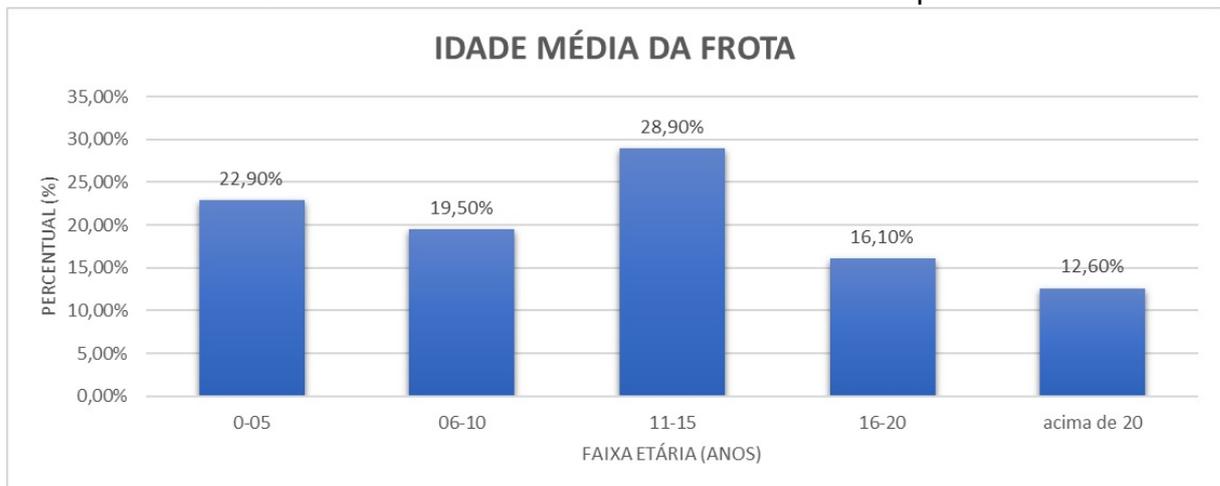
manutenção, o perfil dos motoristas e as condições das rodovias também podem influenciar esse processo.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA FROTA DE SEMIRREBOQUES

Nessa seção, analisam-se as características da frota de semirreboques no Brasil, com foco na idade média da frota e a ausência do sistema ABS, e nas estatísticas de acidentes relacionados ao sistema de freios. Esses dados são cruciais para entender o estado atual dos semirreboques e a importância da manutenção nos sistemas de freio.

A análise da idade média da frota de semirreboques revelou que a maioria dos veículos tem aproximadamente 11 a 15 anos SMABC, (2023). Esse dado é crucial para entender a proporção de semirreboques fabricados antes e depois da implementação da obrigatoriedade do ABS, no Gráfico 1, é possível analisar a idade média da frota.

Gráfico 1 - Idade média da frota de semirreboques



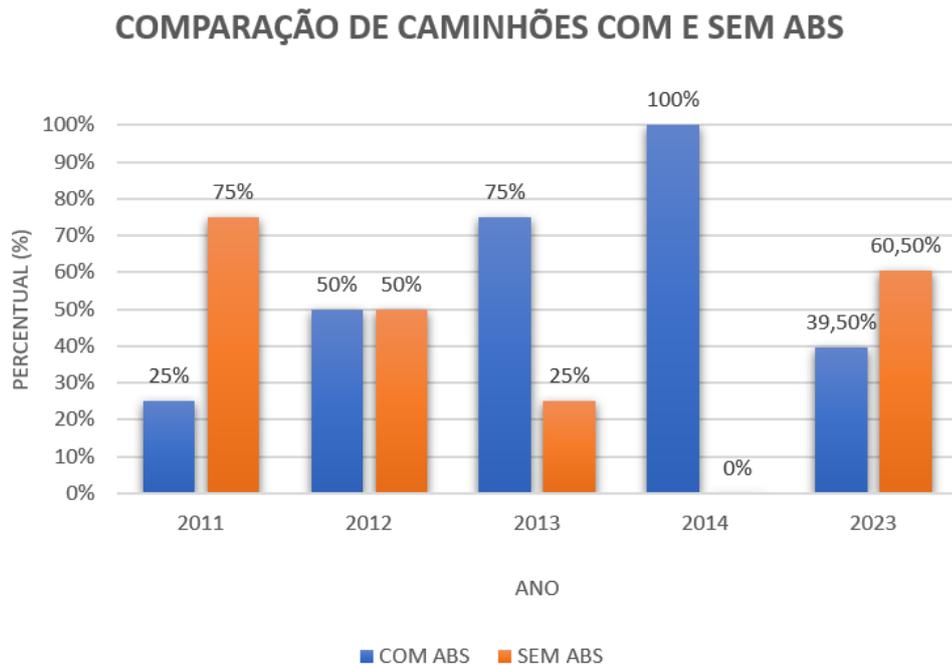
Fonte: Autoria própria (2024)

A idade média elevada representa uma parcela significativa da frota que ainda é composta por implementos fabricados antes de 2014. Esses semirreboques mais antigos podem não ter o sistema ABS em seu sistema pneumático. Sendo propensos a maiores riscos e também acidentes.

2.2 PRESENÇA DO SISTEMA ABS

A análise dos dados revela que uma porcentagem significativa da frota de semirreboques no Brasil ainda não está equipada com o sistema ABS (*Antiblockiersystem*). Sendo uma tecnologia fundamental para a segurança veicular, evitando que as rodas bloqueiem em frenagens bruscas. De acordo com Conselho Nacional de Trânsito (2011) a análise revelou que 60,5% da frota não possuem o sistema ABS atualmente. Essa situação é preocupante, pois a falta de manutenção preventiva pode aumentar o risco de falhas no sistema de freios e comprometer a segurança nas estradas. No Gráfico 2, pode-se observar a relação entre a porcentagem de semirreboques com e sem ABS.

Gráfico 2 - Presença do sistema ABS em Semirreboques



Fonte: Autoria própria (2024)

Desde a regulamentação que tornou o ABS obrigatório em 2014, ainda não foi possível equipar toda a frota nacional. Dados do Ministério de Justiça e Segurança Pública (2022) mostram que muitos veículos fabricados antes dessa data continuam em operação sem o sistema ABS integrado.

2.3 ESTATÍSTICAS DE ACIDENTES

Em relação aos acidentes envolvendo a frota brasileira, os dados mostram que 25% dos acidentes registrados estão relacionados a falhas nos sistemas de freio, o problema no sistema de 27% dos caminhões apresenta algum tipo de defeito nos freios, 124 veículos foram inspecionados e 34 deles apresentaram alguma deficiência no sistema. Essa situação destaca a importância de manter o sistema em condições ideais (POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL, 2022).

Esta situação reflete a necessidade urgente de intensificar as inspeções preventivas e a manutenção periódica nos sistemas de freio de veículos pesados. A alta concentração de falhas revelou que muitos caminhões circulam em condições adversas, colocando em risco não apenas os motoristas, mas também os demais usuários das rodovias.

2.4 DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO

Para o modelo físico foi realizado um levantamento sobre as peças utilizadas no sistema de freio, revisando literatura técnica, manuais de fabricantes e documentos normativos (ABNT). Também envolveram os profissionais especializados para obter testes práticos. Coletar dados sobre a frota de semirreboques no Brasil, incluindo a presença e a ausência do ABS, idade média da frota e estatísticas de acidentes relacionados ao sistema de freio (DENATRAN, 2022).

Um projeto detalhado da bancada de freio pneumático foi elaborado, contemplando as técnicas operacionais dos sistemas de freio em semirreboques fabricados antes de 2014. Foram realizados testes no painel, medindo a pressão do ar em diversas condições, para avaliar a eficácia do sistema em cenários simulados. O modelo físico desenvolvido permite testes e simulações com a mesma precisão do sistema de freio pneumático utilizado em semirreboques sem integração do ABS, replicando operações reais desses equipamentos e sistemas.

Estes testes apresentam variações no sistema, analisando a pressão para cada caso e replicando os desafios enfrentados pelos sistemas de freio pneumáticos em condições reais de operação. Os resultados obtidos são essenciais para a análise crítica do desempenho do sistema e para o desenvolvimento de melhorias contínuas.

Cada componente desempenha um papel essencial no correto funcionamento do sistema, garantindo eficiência e a segurança das operações de frenagem. A seguir,

serão apresentados os principais componentes do sistema de freio pneumático, detalhes de cada peça, suas funções específicas dentro do sistema de análise de frenagem e como elas interagem para formar um sistema.

2.5 COMPONENTE UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DA BANCADA

A construção da bancada de simulação exigiu uma seleção precisa de materiais e componentes que permitissem reproduzir o funcionamento do sistema de freios pneumáticos de semirreboques. Cada item listado na Tabela 1 foi escolhido com base em sua funcionalidade.

Tabela 1 - Lista de materiais utilizados na construção do modelo físico

Item	Descrição	Quantidade	Unidade de Medida
1	Reservatório de ar	01	Unidade
2	Manômetro	03	Unidade
3	Válvula mestre	01	Unidade
4	Válvula relê	01	Unidade
5	Válvula de descarga rosca 16mm	03	mm
6	Botoeira rosca 16mm	02	mm
7	Cuica de freio estacionária	02	Unidade
8	Cuica de freio simples	02	Unidade
9	Válvula de dupla retenção 16mm	01	mm
10	Conexão rosca 16mm x 8mm	20	mm
11	Conexão rosca 16 mm x 12 mm	06	mm
11	Flexível rosca 16mm	06	mm
12	Engate rápido mão amiga	02	Unidade
13	Barra metal 40 x 20 6M	04	Unidade
14	Parafuso 8mm x 30mm	12	mm
15	Parafuso 8mm x 40mm	36	mm
16	Mangueira de nylon 8mm x 5000mm	12	mm
17	Mangueira de nylon 12mm x 2000mm	05	mm

Fonte: Autoria própria (2024)

Esse conjunto de materiais possibilitou a criação de um modelo funcional para simular cenários reais de frenagem. Os componentes utilizados no sistema em estudo desempenham papéis fundamentais para garantir seu correto funcionamento e eficiência. Cada componente foi selecionado com base em critérios técnicos e funcionais, considerando as especificidades do projeto. Esses elementos não apenas asseguram a replicação precisa das condições operacionais, mas também permitem a análise detalhada das respostas do sistema em diferentes situações de frenagem.

2.5.1 Reservatório de ar de comprimido

O reservatório de ar é um componente crucial no sistema de freio pneumático, sendo responsável pelo armazenamento do ar comprimido necessário para operar o sistema de freio do conjunto. Sua principal função é fornecer o ar necessário para as operações de frenagem, garantindo que haja uma reserva adequada de ar disponível para ativar os freios quando necessário.

Quando o pedal de freio é acionado, a pressão do ar comprimido armazenada no reservatório é utilizada para acionar os freios, aplicados nos componentes para iniciar o processo de frenagem. Essa pressão de ar é distribuída para as câmaras de freio e outros componentes do sistema de freio, garantindo uma resposta rápida e eficaz durante a frenagem.

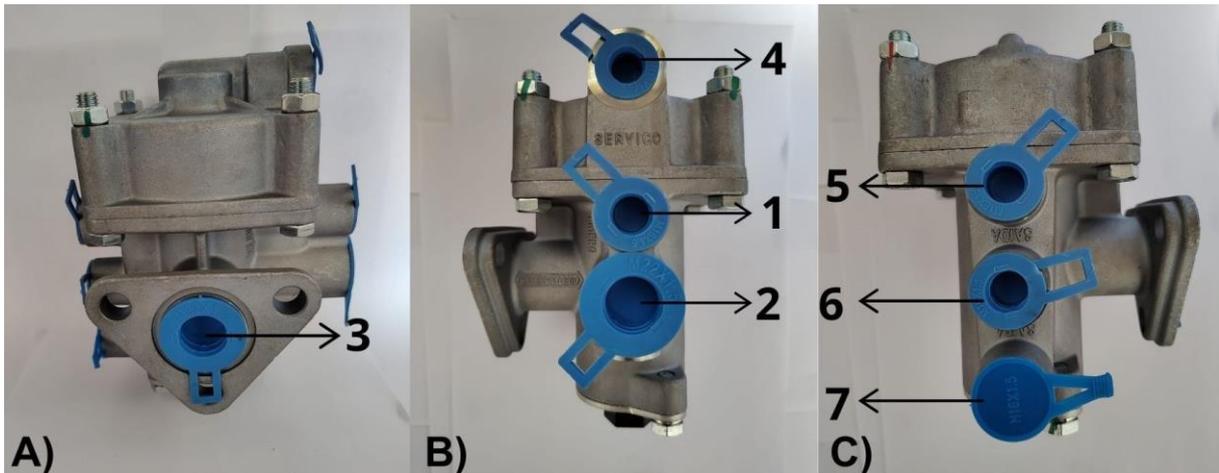
Além de fornecer ar para as operações de frenagem, o reservatório de ar também desempenha um papel importante na estabilização e no equilíbrio do sistema de freio. Ele ajuda a manter uma pressão constante no sistema, garantindo que o sistema sempre esteja preparado para responder prontamente às necessidades do condutor (BORBA et al., 2008).

2.5.2 Válvula mestre

A válvula mestre, também conhecida como válvula de controle de pressão principal, é um componente essencial do sistema de freio pneumático de equipamentos pesados. Conforme Baviera (2024), sua função principal é regular e controlar o fluxo de ar comprimido que é enviado aos freios para ativação e desativação.

Esta válvula é conectada ao reservatório de ar do veículo, que armazena o ar comprimido necessário para o funcionamento do sistema de freios. Quando o pedal de freio é pressionado, a válvula mestre é ativada, permitindo que o ar comprimido seja direcionado para as câmaras de freio e desse modo ele seja aplicado nas sapatas de freio e nos tambores para iniciar o procedimento de frenagem. As válvulas chamadas comumente de mestres, possuem diversas portas e conexões, sendo que cada uma delas desenvolve uma função específica na Figura 2, é apresentada a válvula mestre utilizada no sistema.

Figura 2 - Válvula mestre utilizadas em carretas



Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 2 (A), a conexão 3 da válvula mestre está diretamente ligada ao reservatório de ar. A Figura 2 (B) mostra a conexão 1 que é a alimentação do sistema, onde o ar comprimido entra para ser distribuído ao sistema. A conexão 2 é a saída de ar, que envia o ar comprimido para os componentes que serão ativados. Já a conexão 4 entra em funcionamento apenas quando o pedal de freio é acionado pelo operador, enviando um sinal de ar e liberando o ar comprimido para as conexões 5, 6 e 7 da Figura 2 (C), completando o ciclo do sistema.

2.5.3 Válvula relê

A válvula relê tem a função de sincronizar as operações de frenagem de um conjunto mecânico, sendo um componente fundamental no sistema de freios. Ela contribui diretamente para a melhoria da resposta de frenagem, atuando de forma eficiente para liberar rapidamente a pressão de ar comprimido acumulada nos freios. Esse processo permite uma frenagem mais rápida e eficaz, garantindo a segurança do veículo. Quando o pedal de freio é acionado, a válvula relê reage de imediato, liberando a pressão dos freios e permitindo que as sapatas de freio entrem em contato com os tambores ou discos de freio de forma imediata. Dessa maneira, a válvula relê assegura uma resposta precisa e rápida, otimizando o desempenho do sistema de frenagem, especialmente em situações de emergência (BAVIERA, 2024).

2.5.4 Válvula de descarga

A válvula de descarga é essencial para manter a estabilidade do sistema de freio, garantindo segurança e resposta adequada em diversas condições de operação. Sua atuação previne falhas críticas, tornando o sistema mais confiável, evitando o travamento das rodas, quando a válvula pedal entra em reversão ela diminui a pressão do sistema com uma descarga de alívio, garantindo que as rodas não fiquem travadas conforme descrito por (LIMPERT, 1992).

2.5.5 Válvula painel

O comando de válvula é equipado com 2 botoeiras independentes cada uma exerce sua função, controlando o sistema do conjunto mecânico. A botoeira preta é destinada à alimentação do reservatório de ar do sistema, garantindo que haja pressão suficiente para as operações de frenagem. Quando o cavalo mecânico está desacoplado, essa botoeira impede o retorno do ar comprimido pela saída de emergência. Já a botoeira vermelha é utilizada para acionar o freio estacionário, mantendo o veículo seguro e imóvel enquanto estacionado. De acordo com (RANDON, 2023).

2.5.6 Câmara de freio

A câmara de freio, como descrito por Longhi (2013), é um componente essencial do sistema de frenagem. Essa câmara é destinada ao freio de estacionamento, ela é responsável por manter o veículo parado quando está estacionado, utilizando uma mola interna que mantém as sapatas de freio aplicadas contra os tambores ou discos. Durante a operação normal do veículo, o freio de estacionamento é liberado por meio da aplicação de pressão de ar, que comprime a mola e permite que as rodas girem livremente. A Câmara de Freio Estacionária (ou Câmara de Dupla Ação) possui duas vias distintas para seu funcionamento. A Tabela 2 complementa esta discussão, apresentando um resumo das características de cada sistema.

Tabela 2 – Características das câmaras de freio

Característica	Entrada de Emergência	Entrada de Serviço
Função Principal	Liberar as sapatas de freio em situações de emergência	Acionar o freio durante a operação normal
Acionamento	Pressão de ar (manual ou automático)	Pressão de ar (acionada pelo pedal do freio)
Movimento do Pistão	Recua	Avança
Efeito nas Sapatas de Freio	Libera as sapatas	Aplica pressão nas sapatas
Objetivo	Permitir que as rodas girem livremente para controlar a velocidade em situações críticas	Parar ou manter o veículo estacionado durante a operação

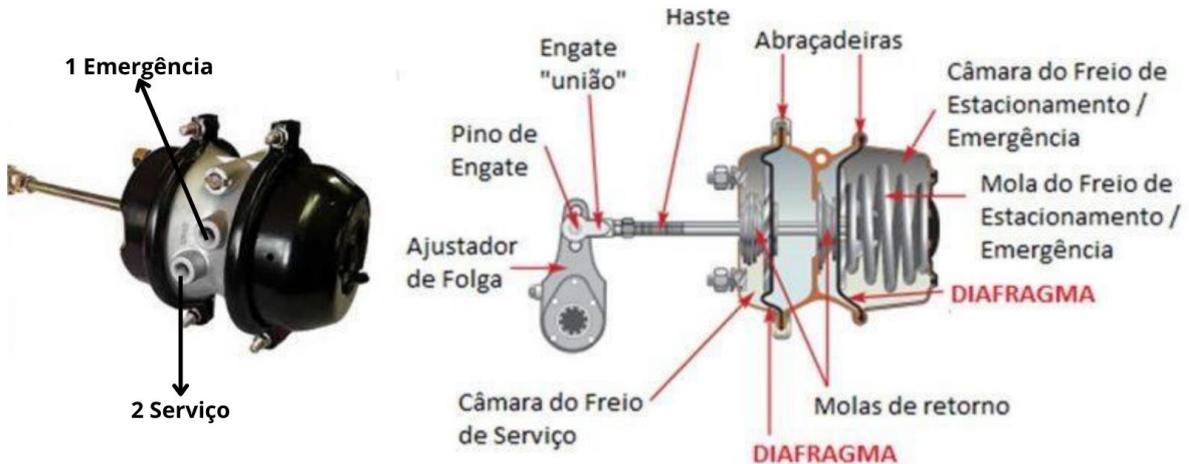
Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática de uma câmara de freio, um componente essencial do sistema de frenagem de veículos. Conforme descrito na Tabela 2, a câmara de freio desempenha um papel crucial na segurança veicular, operando tanto em situações de emergência quanto durante a operação normal. Sua função permite a aplicação ou liberação das sapatas de freio, dependendo da necessidade do sistema.

O funcionamento interno das câmaras de freio depende de componentes fundamentais, como o diafragma, que tem a função de transmitir a pressão do ar para movimentar a haste e ativar os freios. Outro elemento vital é a mola de alta tensão do freio de estacionamento/emergência, que mantém os freios aplicados na ausência de pressão de ar e é comprimida apenas quando o sistema está pressurizado. Além disso, a haste e o pino de engate desempenham um papel essencial ao converter a força pneumática ou gerada pela mola em movimento linear, garantindo a ativação precisa dos freios (SABÓ, 2024).

De forma complementar, a câmara de freio desempenha um papel fundamental na uniformidade das operações de frenagem, garantindo que a força gerada pelo sistema seja aplicada de maneira consistente em todas as rodas do veículo. A interação entre o diafragma, a mola e a pressão permitem que o sistema reaja rapidamente as variações de pressão, proporcionando uma resposta ágil tanto em frenagens regulares quanto em situações de emergência.

Figura 3 – Câmara de freio



Fonte: Adaptado de SABÓ (2024)

A combinação dessas duas vias torna a câmara de freio um componente fundamental tanto para o sistema de frenagem de emergência quanto para o freio de estacionamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados do desenvolvimento do modelo físico construído, com foco na descrição da bancada pneumática. São abordados os principais elementos que compõem o sistema, incluindo o circuito pneumático detalhado, o projeto 3D desenvolvido para planejamento e orientação, e as etapas que envolveram a montagem física da estrutura. Cada aspecto foi projetado e executado para replicar o funcionamento dos sistemas de freio de semirreboques, visando uma simulação prática e funcional.

3.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO FÍSICO CONSTRuíDO

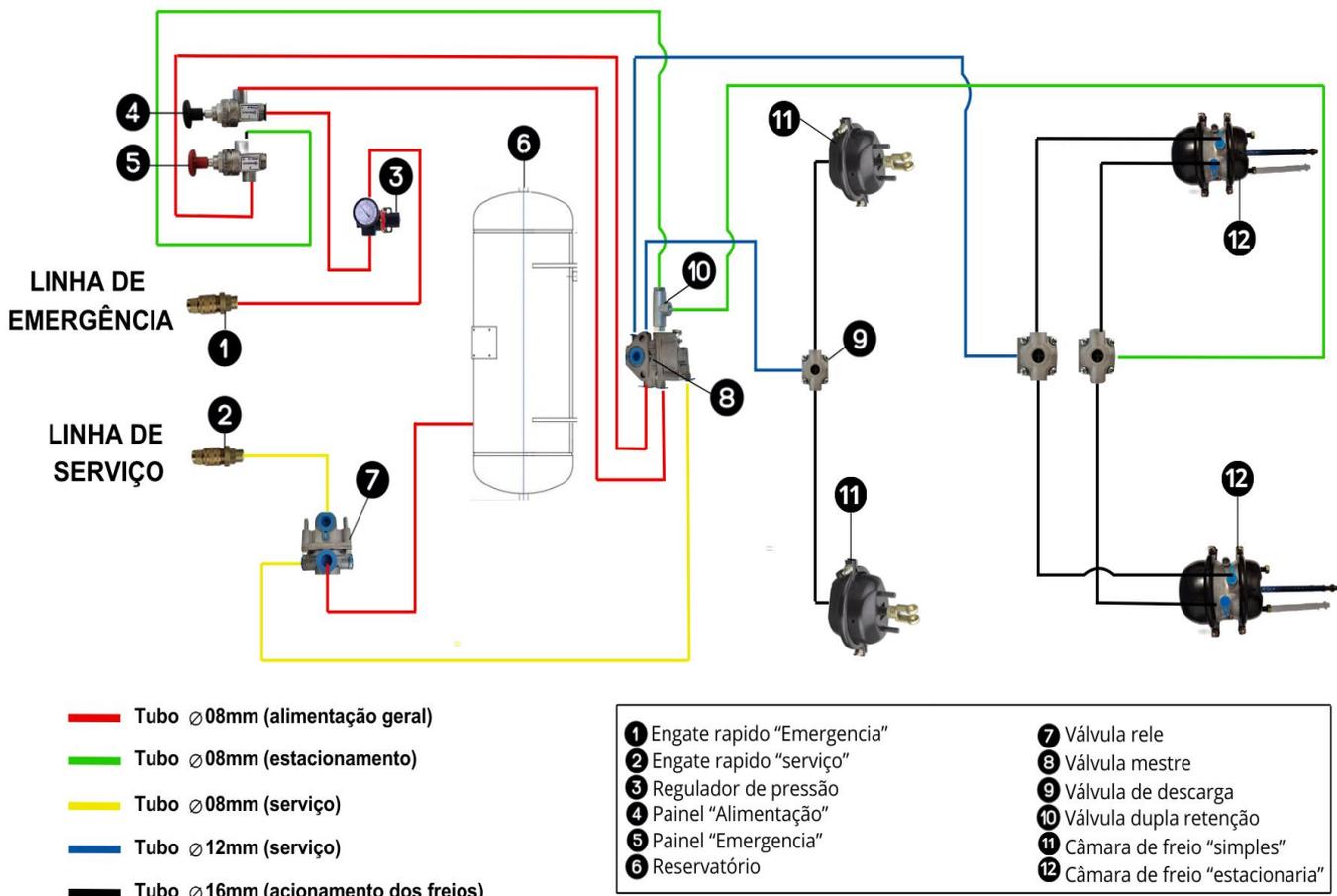
O desenvolvimento do modelo físico foi uma etapa crucial para a simulação prática e experimental dos sistemas de freio. O modelo consistiu em um painel pneumático que replicava os componentes e operações de frenagem dos semirreboques. As etapas de desenvolvimento incluíram inspeção em diversos equipamentos rodoviários adquirindo conhecimentos sobre o circuito pneumático e a

criação de um diagrama esquemático detalhado apresentado na Figura 4 com todos os componentes essenciais.

O circuito pneumático projetado foi dividido em duas linhas principais: a linha de emergência e a linha de serviço. Ambas foram configuradas com tubulações de diferentes diâmetros e cores, assegurando a correta identificação e funcionalidade de cada seção do circuito. O tubo vermelho, de 08 mm de diâmetro, foi utilizado para a alimentação geral do sistema. O tubo amarelo, com o mesmo diâmetro, foi empregado na linha de serviço. O tubo verde, também de 08 mm, foi destinado à linha de estacionamento. Os tubos azul e preto, com 12 mm de diâmetro, foram utilizados no acionamento direto dos freios.

O diagrama apresentado na Figura 4 ilustra de forma detalhada o esquema completo do circuito pneumático, evidenciando a interação entre os diferentes elementos e o fluxo do ar comprimido ao longo do sistema.

Figura 4 – Circuito pneumático

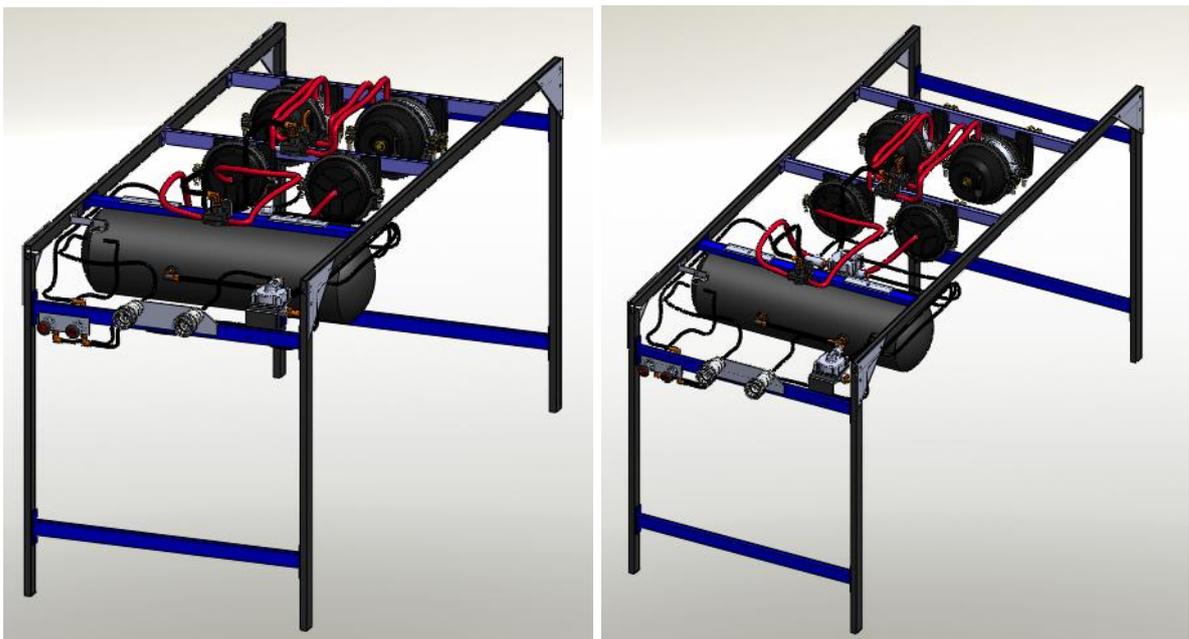


Fonte: Autoria própria (2024)

A elaboração do circuito pneumático e sua representação em diagrama foram etapas fundamentais para compreender e validar o funcionamento do sistema de freios. Esse modelo permitiu não apenas a organização dos componentes de forma lógica e eficiente, mas também garantiu a reprodução do comportamento esperado em um semirreboque real. Com a montagem física baseada no projeto apresentado, foi possível criar uma estrutura funcional que servirá de base para experimentos futuros e análises detalhadas do desempenho do sistema, contribuindo para o aprimoramento da segurança e eficiência dos freios pneumáticos em aplicações rodoviárias.

O desenvolvimento do projeto contou com o uso do software SolidWorks, uma ferramenta de CAD (Computer-Aided Design) amplamente utilizada para modelagem 3D na engenharia de produtos, desenvolvida pela Dassault Systèmes. O SolidWorks foi essencial para a criação de um modelo tridimensional detalhado, permitindo a visualização precisa da estrutura e facilitando o planejamento de cada etapa do processo de construção. A partir do projeto virtual, foi possível iniciar a montagem física, começando pela estrutura metálica composta por tubos de metal e, posteriormente, integrando os componentes do sistema pneumático. A Figura 5 apresenta o projeto desenvolvido no SolidWorks, evidenciando a disposição dos elementos que formam a bancada simuladora.

Figura 5 – Projeto 3D da bancada



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a finalização do projeto em software, iniciou-se a montagem física da bancada com a preparação e soldagem dos tubos de metal que compõem a estrutura principal. Esses tubos foram cortados e ajustados conforme as dimensões especificadas do projeto, garantindo a formação de uma base estável e resistente para suportar os componentes do sistema pneumático. Para a união das peças, foi utilizado o processo de soldagem MIG/MAG, que oferece alta precisão, boa penetração e acabamento uniforme, assegurando a robustez das conexões e a durabilidade da estrutura.

Concluída a estrutura metálica, iniciou-se a instalação do reservatório de ar, responsável pelo armazenamento do ar comprimido necessário para a operação do sistema. Em seguida, procedeu-se à instalação das válvulas principais, incluindo a válvula mestre, a válvula relé e as válvulas de descarga.

A válvula mestre foi conectada ao reservatório para controlar o fluxo de ar transmitido às câmaras de freio, enquanto a válvula relé foi instalada para melhorar a resposta de frenagem. A válvula de descarga foi incluída para regular a pressão do sistema e evitar o travamento das rodas.

Essas válvulas foram conectadas por meio de tubulações, garantindo uma conexão segura e eficiente para a condução do ar comprimido ao longo do sistema. Foram utilizadas mangueiras de nylon de alta resistência com diâmetros de 8 mm e 12 mm, específicas para suportar as pressões típicas dos sistemas de freio pneumáticos. Além disso, conexões rosqueadas de diferentes especificações, como 16 mm x 8 mm e 16 mm x 12 mm, foram empregadas para assegurar a vedação e evitar vazamentos de ar durante o funcionamento.

As câmaras de freio foram então montadas na bancada e conectadas à válvula mestre. Além disso, manômetros de medição foram instalados em pontos estratégicos das câmaras para monitorar a pressão do ar em diferentes etapas, coletando dados durante os testes. As botoeiras de acionamento também foram integradas à bancada. Duas botoeiras independentes foram instaladas: Uma para controlar a alimentação do sistema e evitar o retorno de ar quando desacoplado, e a outra para liberar o freio estacionário. Por fim, a válvula reguladora de pressão foi conectada ao sistema para assegurar que a pressão do ar se mantivesse constante durante a simulação na Figura 6, sendo apresentada à bancada.

Figura 6 - Bancada pneumática de freio



Fonte: A autoria própria (2024)

A Figura 6, apresenta a bancada de simulação completa, onde todos os componentes foram integrados conforme o projeto inicial. A disposição dos elementos, como válvulas, câmaras de freio e manômetros, permite replicar o funcionamento real do sistema de frenagem pneumática utilizado em semirreboques. Essa configuração facilita o controle e o monitoramento das variáveis envolvidas, possibilitando a execução de testes e coleta de dados. Esse nível de detalhamento permite que a bancada funcione como uma ferramenta para análise.

3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A análise dos resultados obtidos com o painel pneumático revelou que ele é eficaz na simulação das operações de frenagem de semirreboques. O painel conseguiu replicar com precisão as pressões e forças envolvidas no processo de frenagem, permitindo uma análise crítica do desempenho do sistema. No entanto, é

importante destacar que a ausência de integração com o ABS em muitos semirreboques mais antigos continua sendo um desafio significativo para a segurança rodoviária.

3.2.1 Teste de Capacidade do Reservatório de Ar

O reservatório de ar mostrou-se capaz de manter uma pressão de 8 bar durante a simulação de frenagens sucessivas. Observou-se que, em condições de alta demanda, o reservatório apresentou quedas de pressão que poderiam comprometer o sistema. A estabilidade no reservatório foi registrada em diferentes intervalos de tempo, sendo um indicador em situações reais.

3.2.2 Teste de Controle da Válvula Mestre

Durante o acionamento da válvula mestre, os testes registraram tempos de resposta de aproximadamente 2,0 segundos para a transmissão do ar comprimido até as câmaras de freio. Esse tempo de resposta foi avaliado em várias condições, incluindo cenários de acionamento contínuo e condições de emergência, mostrando que a válvula consegue garantir uma resposta rápida e precisa do sistema de frenagem.

3.2.3 Teste de Sincronização da Válvula Relé

A válvula relé demonstrou eficiência na sincronização da resposta de frenagem, atuando com um tempo de resposta de apenas 1,5 segundos em relação à válvula mestre. Esse tempo foi especialmente relevante durante a simulação de frenagens bruscas, onde a válvula relé aprimorou o desempenho geral do sistema, garantindo que o ar comprimido fosse rapidamente liberado nas câmaras de freio, proporcionando uma resposta imediata.

3.2.4 Teste Válvula de Descarga

O teste da válvula de descarga foi fundamental para verificar a capacidade de liberar a pressão rapidamente, evitando o travamento das rodas. Durante as simulações, a válvula foi acionada automaticamente sempre que o pistão de freio

entra em trabalho reverso, aliviando a pressão garantindo a estabilidade e a segurança do sistema em condições de frenagem evitando o travamento contínuo do equipamento.

3.2.5 Conversão de Pressão nas Câmaras de Freio

As câmaras de freio, foram submetidas a testes detalhados, permitindo a análise de duas entradas distintas: a Entrada de Serviço e a Entrada de Emergência, cada uma com função específica no sistema. A entrada de Serviço é utilizada durante o acionamento normal dos freios e, nas simulações realizadas, foi operada com pressões variando entre 6 e 8 bar. Por sua vez, a entrada de Emergência é acionada em situações específicas para permitir o recuo do pistão, liberando as sapatas de freio nos testes, essa entrada operou com pressões de 4 a 6 bar para a liberação do sistema caso o sistema apresente alguma falha de pressão o pistão avança fazendo que as sapatas vejam travadas novamente. Essa funcionalidade é crucial para a segurança do semirreboque, especialmente em condições onde é preciso travar o equipamento.

3.2.6 Monitoramento de Pressão com Manômetros

Os manômetros instalados nos pontos estratégicos indicaram que a pressão se manteve constante em cada ponto do sistema, com variação de 0,3 bar entre válvulas e as câmaras de freio. Esse controle de pressão em tempo real possibilitou a verificação da integridade das conexões e das válvulas, além de assegurar a eficiência do sistema ao longo dos testes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma bancada pneumática para a simulação e análise do funcionamento de sistemas de freios em semirreboques, abordando desde os conceitos fundamentais até a montagem prática. Diante da importância do transporte rodoviário no Brasil e dos dados alarmantes relacionados a falhas nos sistemas de freio, a pesquisa destacou a necessidade de soluções práticas e inovadoras para melhorar a segurança e a eficiência operacional desses veículos.

A construção da bancada foi um marco essencial neste estudo, integrando componentes-chave, como reservatórios, válvulas e câmaras de freio, conectados por tubulações e conexões de alta precisão. O projeto desenvolvido no SolidWorks permitiu a organização detalhada do sistema, garantindo que a montagem física replicasse as condições reais de operação. O uso de soldagem MIG/MAG e materiais de alta resistência assegurou a robustez e a durabilidade da estrutura, permitindo que o sistema suportasse pressões típicas dos freios pneumáticos. A inclusão de elementos como manômetros estratégicos e botoeiras independentes contribuiu para uma simulação eficiente, abrindo possibilidades para estudos experimentais mais avançados.

Os resultados demonstram que a bancada construída não apenas atende às expectativas em termos de funcionalidade, mas também oferece um valioso recurso para treinamentos técnicos e diagnósticos de manutenção. Por meio dela, é possível compreender os processos dinâmicos envolvidos no sistema de freios, identificar falhas e propor melhorias direcionadas. Sua utilização prática em um ambiente controlado proporciona segurança para análises detalhadas e pode servir como uma ferramenta educativa essencial para formar profissionais capacitados no setor.

Este estudo também contribui para o desenvolvimento de soluções futuras. A integração de tecnologias mais modernas, como sensores inteligentes, controle eletrônico e sistemas ABS. Além de poder ampliar a capacidade de simulação e tornar os resultados ainda mais precisos.

Assim, o presente trabalho conclui destacando a relevância da bancada pneumática como uma solução prática e inovadora para o setor de transporte rodoviário. Sua aplicação prática não apenas impulsiona avanços técnicos, mas também contribui para a segurança nas estradas, a redução de acidentes e a preservação da integridade dos veículos e das cargas transportadas. Com isso, esta pesquisa reafirma o papel fundamental da engenharia no desenvolvimento de tecnologias que atendam às demandas do mercado, promovendo maior eficiência e confiabilidade nos sistemas de freio.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Rafael Ferreira. **Gestão da manutenção, elaboração de um controle de manutenção em uma frota de caminhões: empresa familiar.** 2020.

BARIVIERA, Igor. **Estudo de engenharia reversa, análise dos modos de falhas e proposição de melhoria para sistema de freio pneumático em composições de veículos de carga.** 2024.

BORBA, J. L. et al. **Sistema de Locomotivas e Vagões I – Módulo Sistema de Freios.** Vitória: Valer, 2008.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. **Lei nº 9.503: Dispõe sobre a obrigatoriedade do uso do sistema antitravamento das rodas – ABS.** 380 ed. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/cons380-1.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2024.

FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto et al. **Segurança no trânsito.** 3. ed. Curitiba, PR: Ed. dos Autores, 2023. Bibliografia. ISBN 978-65-00-85500-5.

GARCÍA RUESGA, Marcos Antonio. **Estudo do desempenho da frenagem de um veículo bitrem equipado com ABS, sob distintas configurações desse sistema e do pavimento da via.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2013.

LIMPERT, Rudolf. **Brake Design and Safety.** Warrendale, PA, EUA: Society of automotive engineers (SAE), 1992.

LONGHI, Murilo Scherner. **Dimensionamento do sistema de freio de um semirreboque.** 2013.

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICOS. **Fiscalizações da PRF flagram 27% dos veículos de carga com problema nos freios na BR-364.** Mato Grosso, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/prf/pt-br/noticias/estaduais/mato-grosso/2022/agosto/fiscalizacoes-da-prf-flagram-27-dos-veiculos-de-carga-com-problema-nos-freios-na-br-364-1>. Acesso em: 07 abr. 2024.

MOREIRA, Marco Antonio Laurelli; DE FREITAS JUNIOR, Moacir; TOLOI, Rodrigo Carlo. **O transporte rodoviário no Brasil e suas deficiências.** Refas-Revista Fatec Zona Sul, v. 4, n. 4, p. 1-13, 2018.

OLIVEIRA, Antonio Carlos de. **Desempenho na frenagem de veículos combinados do tipo cavalo-mecânico e semi-reboque com válvulas ALB.** 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL. **PRF apreende carreta carregada transitando com sistema de freio defeituoso.** Justiça e Segurança Pública, Minas Gerais, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/prf/pt-br/noticias/estaduais/minas->

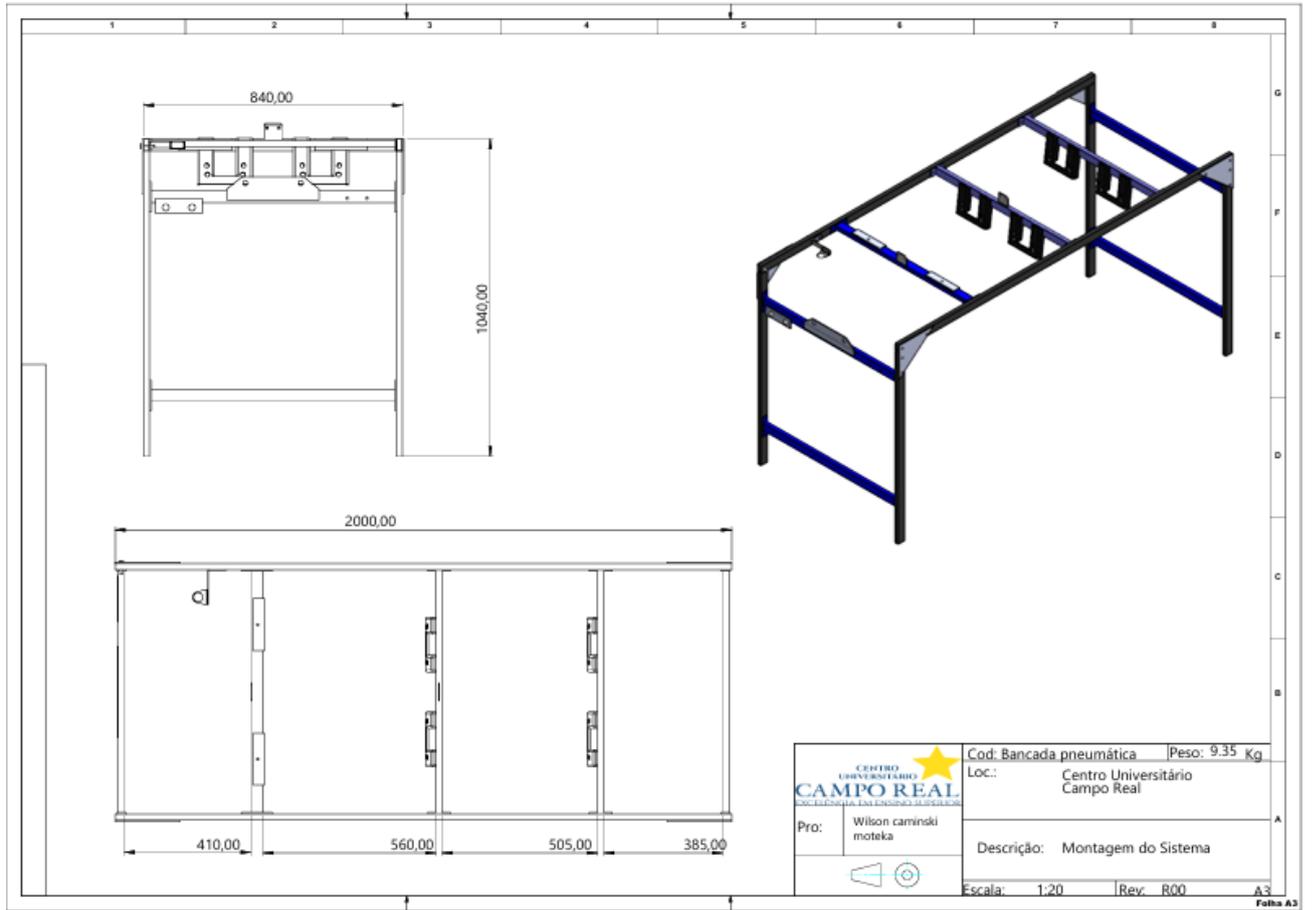
gerais/2022/janeiro/prf-apreende-carreta-carregada-transitando-com-sistema-de-freio-defeituoso.Acesso em: 07 abr. 2024.

RANDON S.A. **Implementos e Participações**. Manual Carrega Tudo. Disponível em: <https://randon.com.br/storage/Cat%C3%A1logos/Manual%20Docs/10manual-carrega-tudopdf_c6dfa7ad-6215-4c01-ab57-b463e7b5eb1d.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2024.

SABÓ: **Câmara de Freio**. Câmara de Freio. 2024. Disponível em: https://www.sabo.com.br/diafragma/#elementor-toc__heading-anchor-6. Acesso em: 15 out. 2024.

SINDICATO DOS METALURGICOS: Frota de caminhões no país atinge 2,18 milhões de unidades em 2023. São Bernardo do Campo/Sp, 25 abr. 2024. Disponível em: [https://smabc.org.br/frota-de-caminhoes-no-pais-atinge-218-milhoes-de-unidades-em-2023/#:~:text=A%20frota%20de%20caminh%C3%B5es%20atingiu,para%20Ve%C3%ADculos%20Automotores%20\(Sindipe%C3%A7as\)](https://smabc.org.br/frota-de-caminhoes-no-pais-atinge-218-milhoes-de-unidades-em-2023/#:~:text=A%20frota%20de%20caminh%C3%B5es%20atingiu,para%20Ve%C3%ADculos%20Automotores%20(Sindipe%C3%A7as)). Acesso em: 16 set. 2024.

Anexo A: Estrutura metálica



Anexo B: Bancada Pneumática completa

