

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

LEONARDO HERBERTS PIANESSO

INFLUÊNCIA DO TIPO DE VÁLVULA DE CONTROLE
NO TEMPO DE FRENAGEM DE VAGÕES

Joinville
2019

LEONARDO HERBERTS PIANESSO

INFLUÊNCIA DO TIPO DE VÁLVULA DE CONTROLE
NO TEMPO DE FRENAGEM DE VAGÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, no curso Engenharia Ferroviária e Metroviária da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.

Joinville
2019

LEONARDO HERBERTS PIANESSO

INFLUÊNCIA DO TIPO DE VÁLVULA DE CONTROLE
NO TEMPO DE FRENAGEM DE VAGÕES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr. Eng.
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Evandro Cardozo da Silva, Dr. Eng.
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina

*Este trabalho é dedicado a todas minorias que,
ainda hoje, sofrem preconceito dentro da engenharia.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais Alcione e Mariléia, e meu irmão Marcelo, que sempre me apoiaram a estudar e seguir meus objetivos. Sem o amor e compreensão de vocês nada disso teria sido possível. Muito obrigado.

À Vale S.A. e a todos que me auxiliaram durante meu estágio e simulações utilizadas nesse trabalho. Agradecimentos especiais a Thiago Silva Martins, meu orientador de estágio, pelos ensinamentos que levarei para minha vida profissional; e aos funcionários do Centro de Engenharia Logística, onde estagiei, e com muita dedicação me acolheram e compartilharam seus conhecimentos: Leonardo Dias, Eustáquio de Andrade, Rogério Alvim, Leonardo Mendonça, Ronilson Vieira, Nelson Romanha.

Ao LabMAD - Laboratório de Modelagem e Análise de Dados, e ao professor Alexandre Mikowski, orientador desse trabalho e supervisor do laboratório, pelo suporte dado na elaboração do mesmo.

Aos professores da UFSC que se dedicam para o curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária, na formação de novos engenheiros: Mikowski, Yesid, Régis, Marcus, Elisete, Evandro.

Aos amigos que fiz na UFSC, Jordana, Vitória, Mariana, Rafaella, Luiza, Laura, Letícia e Monique, que se tornaram parte importante da minha formação como pessoa, agradeço a todas palavras de incentivo e companheirismo durante esses anos.

Aos amigos de longa data, João, Ellen, Pedro, Ana, Sarah e Annelise, por estarem comigo e me apoiando, durante tantos anos e por tantos desafios.

A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.

Nelson Mandela

RESUMO

O bom desempenho do transporte ferroviário depende de vários fatores, inclusive da eficiência do seu sistema de freio. Por se tratar de um sistema mecânico com uma massa muito grande em movimento, o sistema de freio de uma composição ferroviária deve ser adequado para realizar as frenagens durante a operação, que são utilizadas não apenas para parar totalmente o trem, mas também auxiliam nos trajetos íngremes e curvas. Atualmente, os sistemas de freio pneumático são os mais utilizados em composições de transporte de carga ferroviária, que utilizam ar comprimido como sinal e força motriz para a frenagem. As simulações computacionais auxiliam no entendimento de como esse sistema funciona, suas vantagens e permitem analisar o funcionamento do mesmo. Esse trabalho objetiva simular e analisar diferentes operações de frenagem ferroviárias (operação mínima, total e de emergência) com variações de quantidade de vagões nas composições de 50 a 200, utilizando o simulador Train-Dynamics Systems 5000 (TDS) da New York Air Brake e as válvulas de controle AB, ABD e ABDX, produzidas pela Westinghouse Air Brake Company (WABCO). Os tempos que as válvulas levaram para mandar o sinal da frenagem por toda a composição e os tempos para chegar no regime permanente de operação foram calculados e então discutidos, notando que as válvulas ABDX e ABD possuem tempo de resposta menores quando comparadas com a válvula AB.

Palavras-chave: Simulação ferroviária. Sistema de freio. Válvulas ferroviárias. Train-Dynamics System 5000.

ABSTRACT

The good performance of rail transportation is dependent on several factors, including the efficiency of the brake system. As it is a mechanical system with a very large mass in motion, the brake system of a railway composition should be suitable for braking during operation, which are used not only to stop the train altogether, but also to assist in the steep paths and curves. Currently, pneumatic brake systems are the most commonly used in railway freight transport compositions, which use compressed air as a signal and driving force for braking. The computational simulations help understanding how this system works, its advantages and to analyze how the system operates. This work aims to simulate and analyze different rail operations (minimum, total and emergency) with variations of the number of wagons in the compositions from 50 to 200 using the New York Air Brake Train-Dynamics Systems 5000 (TDS) simulator and the AB, ABD and ABDX control valves produced by Westinghouse Air Brake Company (WABCO). The times the valves took to send the brake signal throughout the whole composition and the times to reach the permanent regime were calculated and then discussed, noticing that the ABDX and ABD valves have a shorter response time when compared to the AB valve.

Keywords: Railway simulation. Brake system. Control valves. Train-Dynamics System 5000.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do sistema de freio a Ar Direto.	14
Figura 2 – Representação esquemática do sistema de freio a ar automático. . .	15
Figura 3 – Representação esquemática do carregamento do sistema de freio. .	16
Figura 4 – Representação esquemática da aplicação do freio.	16
Figura 5 – Representação esquemática do alívio do freio.	17
Figura 6 – Representação esquemática das posições do manipulador automático de freio.	18
Figura 7 – Representação esquemática das válvulas de controle. (a) Válvula AB, (b) Válvula ABD e (c) Válvula ABDX.	19
Figura 8 – Carregamento do freio na válvula AB.	21
Figura 9 – Aplicação do freio na válvula AB.	22
Figura 10 – Recobrimento na válvula AB.	22
Figura 11 – Alívio na válvula AB.	23
Figura 12 – Emergência na válvula AB.	24
Figura 13 – Simulador TDS 5000.	27
Figura 14 – Resultados da Operação Mínima: (a) Aplicação e (b) Estabilização.	30
Figura 15 – Resultados da Operação Mínima: (a) Alívio e (b) Estabilização. . . .	32
Figura 16 – Resultados da Operação Total: (a) Aplicação e (b) Estabilização. . .	34
Figura 17 – Resultados da Operação Total: (a) Alívio e (b) Estabilização.	35
Figura 18 – Resultados da Operação de Emergência: (a) Aplicação e (b) Estabilização.	37
Figura 19 – Resultados da Operação de Emergência: (a) Alívio e (b) Estabilização.	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TCC	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Sistema de Freios	13
2.1.1	Sistema de Freio a Ar Direto	13
2.1.2	Sistema de Freio a Ar Automático	15
2.2	Válvulas de Controle	18
2.3	Operações de Frenagem Ferroviária	20
2.3.1	Carregamento do freio	20
2.3.2	Aplicação do freio	21
2.3.3	Alívio do freio	23
2.3.4	Aplicação de emergência	23
2.3.5	Alívio do freio após emergência	24
2.4	Estado da Arte	24
3	METODOLOGIA	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Operação Mínima	30
4.2	Operação Total	33
4.3	Operação de Emergência	36
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42
	ANEXO A	44
	ANEXO B	47

1 INTRODUÇÃO

O transporte no Brasil se dá com a priorização do modo rodoviário, representando 52% de todo o transporte de cargas no país. Já o modal ferroviário contribui com 30% do transporte. Esse percentual cai ainda mais ao retirar o minério de ferro dessa projeção: o ferroviário representa apenas 10% do transporte do país e o rodoviário 68%, demonstrando a dependência desse modo de transporte na matriz brasileira (TRANSPORTES, 2012, p. 24).

O modal ferroviário tem como algumas características importantes (PROFILLIDIS, 2006, p. 4):

- a habilidade de transportar grandes volumes de carga;
- baixo consumo de energia;
- impacto ambiental menor em comparação a automóveis;
- segurança da operação.

O transporte ferroviário apresenta um custo de R\$ 0,016 por tonelada por quilômetro transportado. Comparando esse valor com o modal rodoviário que custa R\$ 0,056 por tonelada por quilômetro transportado, a ferrovia se torna 3,5 vezes mais econômica que o modal mais utilizado no Brasil e ainda possui vida útil de 30 anos de uso, sendo 20 anos a mais que o rodoviário (COLAVITE; KONISHI, 2015, p. 9). Essas características demonstram a eficiência e a importância das operações ferroviárias na logística de transportes.

Entender o funcionamento do sistema de freio ferroviário é imprescindível para uma boa operação, desde a melhor eficiência energética e uso de recursos até a segurança operacional. As frenagens ocorrem com frequência durante a operação, utilizadas para parar e controlar a velocidade de operação do trem, sendo um dos sistemas mais requisitados de uma composição ferroviária. Além disso, a representação gráfica das válvulas ferroviárias não é muito documentada atualmente, sendo apenas conhecida por especialistas da área.

A importância de simulações computacionais no setor ferroviário é notável, tendo em vista as grandes proporções de seus equipamentos e a dificuldade de se realizar testes empíricos. Para realizar o teste do comportamento do sistema de freio de uma composição de 100 vagões seria necessário ocupar uma linha férrea por todo o período do teste e ainda retirar de circulação os vagões e locomotiva utilizados. Alterar parâmetros como o tipo de válvula utilizado nos vagões demandaria muito tempo, tendo que trocar toda a composição de vagões. Isso resulta em uma perda significativa

de produtividade. Ao utilizar a simulação computacional, os parâmetros podem ser alterados e redefinidos rapidamente, utilizando programa específico para tal finalidade.

1.1 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar a influência do tipo de válvula de controle nos tempos de aplicação e alívio das operações de frenagem ferroviária mínima, total e de emergência.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Realizar simulações computacionais com o programa Train-Dynamics Systems 5000 (TDS) da New York Air Brake para determinar os tempos de resposta após as operações de frenagem ferroviária;
- b. Determinar a taxa de variação do tempo de resposta após operações de frenagem ferroviária em função do número de vagões em uma composição, com os dados numéricos gerados das simulações computacionais com o TDS;
- c. Verificar a eficiência no tempo de resposta de frenagem das válvulas de controle AB, ABD e ABDX, nas simulações computacionais com o TDS.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TCC

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, iniciando com esta Introdução. O capítulo 2, Fundamentação Teórica, apresenta os conceitos necessários para a compreensão do texto. A seção Sistema de Freios aborda o histórico do sistema de freios e sua utilização atual. A seção Válvulas de Controle apresentam as válvulas utilizadas nesse trabalho e comenta as suas variações. A seção Operações de Frenagem Ferroviária aborda as diferenças entre as operações de frenagem ferroviária utilizadas nesse trabalho. Para Marconi e Lakanos (2013, p. 57) "A pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias teses, [...]". Para Gil (2010, p. 29) "A pesquisa bibliográfica é elaborada com base em material já publicado. Tradicionalmente, essa modalidade inclui material impresso, como livros, revistas, jornais, teses, dissertações e anais de eventos científicos". Gil (2010, p. 31) ainda comenta que "[...] seja considerada fonte documental quando o material consultado é interno à organização, e fonte bibliográfica quando for obtido em bibliotecas ou base de dados". Assim sendo, esse trabalho apresenta fontes

bibliográficas, provindas de dissertações e livros publicados; e fontes documentais, a partir de manuais e apostilas internas.

O capítulo 3, Metodologia, aborda a metodologia utilizada durante as simulações computacionais realizadas para esse trabalho. Apresenta quais dados foram retirados das simulações.

O capítulo 4, Resultados e Discussões, apresenta os resultados obtidos nas simulações computacionais, além de fazer uma análise e discussão dos mesmos. Marconi e Lakanos (2013, p. 21) comentam que análise é a tentativa de explicar as relações entre o assunto estudado e outros fatores. Divide-se em três níveis: interpretação, explicação e especificação. Nesses níveis ocorre a verificação das relações entre as variáveis, esclarecimento sobre a origem das variáveis e até que ponto as variáveis são dependentes. Sobre interpretação, os autores comentam "é a atividade intelectual que procura dar um significado mais amplo às respostas, vinculando-as a outros conhecimentos. Em geral, interpretação significa a exposição do verdadeiro significado do material apresentado, em relação aos objetivos propostos e ao tema" (MARCONI; LAKANOS, 2013, p. 21).

O capítulo 5, Conclusões, conclui o presente trabalho, indicando os principais resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos teóricos de Sistemas de Freios, Válvulas de Controle e Operações de Frenagem Ferroviária serão apresentados para o leitor compreender as simulações realizadas e os resultados obtidos.

2.1 Sistema de Freios

Nessa seção será abordada um histórico do sistema de freios e como ele é utilizado atualmente. Os sistemas de freios a ar comprimido dividem-se em sistema de freio a Ar Direto e sistema de freio a Ar Automático.

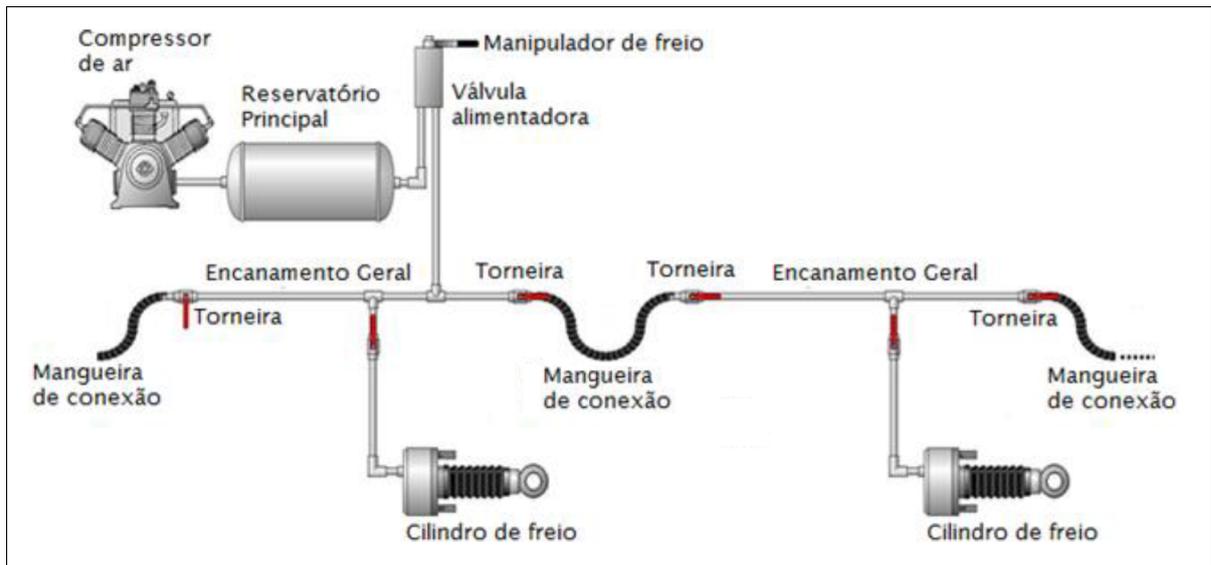
2.1.1 Sistema de Freio a Ar Direto

O sistema de freio utilizando ar comprimido foi desenvolvido em 1869 por George Westinghouse para uso ferroviário. Sua primeira versão ficou conhecida como sistema de freio a Ar Direto, com o ar comprimido fluindo diretamente do reservatório principal aos cilindros de freio dos vagões (BORBA et al., 2008, p. 10).

A Figura 1 apresenta o sistema de freio a Ar Direto. O sistema a Ar Direto utiliza os seguintes componentes (BORBA; BERGANTINI, 2011, p. 4):

- Compressor de ar, que fornece o ar comprimido;
- Reservatório principal, vaso de pressão em que o ar comprimido é armazenado;
- Válvula alimentadora, que controla a liberação do ar comprimido para o encanamento geral;
- Encanamento geral, que é composto por tubos ligados por mangueiras flexíveis e levam o ar comprimido ao longo do trem;
- Cilindro de freio, cilindro pneumático de acionamento simples com retorno de mola, deslocado devido a força do ar comprimido;
- Timoneria de freio, conjunto de alavancas e tirantes que conectadas ao cilindro de freio, que transferem os esforços para as sapatas de freio que atiram as rodas de forma mecânica.

Figura 1 – Representação esquemática do sistema de freio a Ar Direto.



Fonte: Borba e Bergantini (2011, p. 5).

No sistema de freio a Ar Direto o ar comprimido fica armazenado apenas no reservatório principal. Ao acionar o freio por meio do manipulador que está ligado com a válvula de controle, o ar comprimido flui através das mangueiras do encanamento geral para as câmaras dos cilindros de freio localizados em cada vagão. O ar comprimido faz com que a haste do cilindro avance, aplicando uma força na timoneria de freio, que repassa essa força as rodas da composição ferroviária. Devido ao fato do ar comprimido ter que sair do reservatório principal e chegar em cada vagão, a partir da locomotiva, os primeiros vagões da composição iniciam a frenagem antes dos últimos. Os vagões finais que não iniciaram a frenagem acabam empurrando os vagões iniciais que já se encontram com os freios aplicados, gerando choques e esforços na composição.

O alívio dos freios se dá liberando o ar comprimido das mangueiras e cilindros para a atmosfera. As molas dos cilindros, que se encontravam em compressão pela ação do ar comprimido, fazem a haste do cilindro retornar a posição de repouso, cessando a força aplicada nas rodas.

Esse sistema apresentava diversas características que não o deixavam apto para uso abrangente, tais como (BORBA et al., 2008, p. 12):

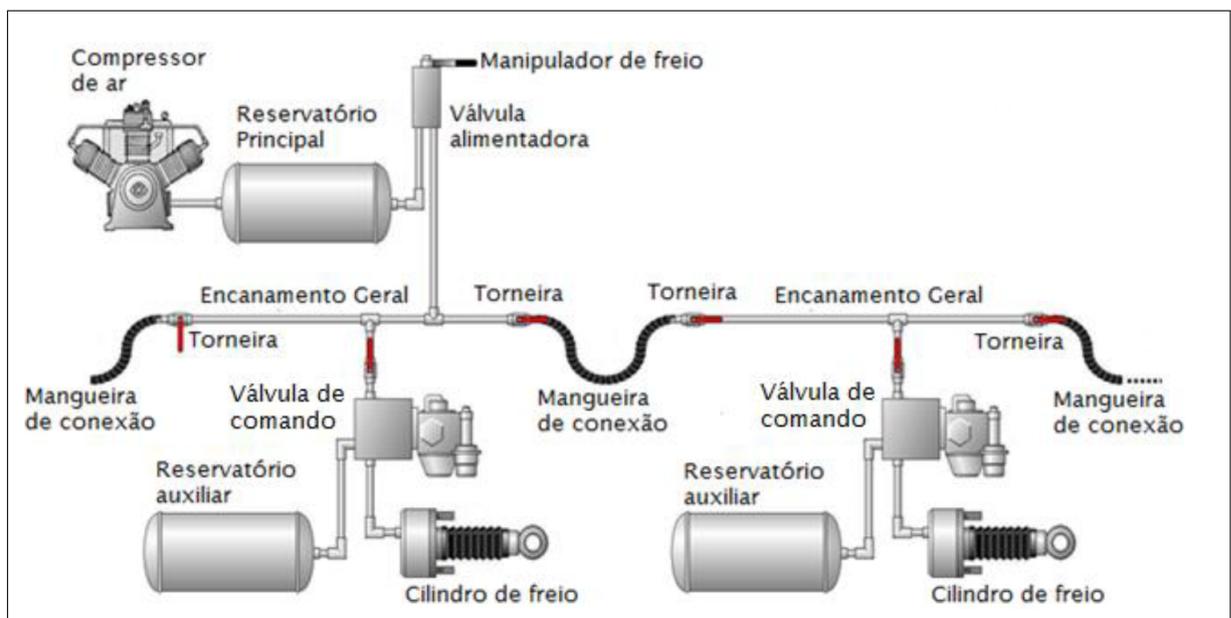
- Tamanho excessivo de seus componentes;
- Eficiência reduzida para composições com mais de 12 vagões;
- Manutenção trabalhosa;
- Rendimento reduzido em grandes altitudes (devido ao ar rarefeito);
- Os freios não dispunham de segurança contra a falha do sistema (rompimento das mangueiras de encanamento ou fracionamento do trem), impossibilitando a aplicação dos freios nessas situações.

2.1.2 Sistema de Freio a Ar Automático

Em 1872 Westinghouse patenteou outro sistema, denominado de sistema de freio a Ar Automático, em que os freios são ativados automaticamente em toda a composição em caso de vazamento ou rompimento da mangueira do encanamento geral. A Figura 2 apresenta o sistema de freio a Ar Automático. Para implementar esse novo sistema foi necessário adicionar aos componentes já citados do sistema de freio a Ar Direto (BORBA; BERGANTINI, 2011, p. 6):

- Válvula de controle (também conhecida por válvula de comando), que é responsável pela aplicação ou alívio dos freios, comandada pela diferença de pressão entre o encanamento geral e o reservatório auxiliar;
- Reservatório auxiliar, vaso de pressão que armazena ar comprimido e é responsável pelo acionamento dos freios.

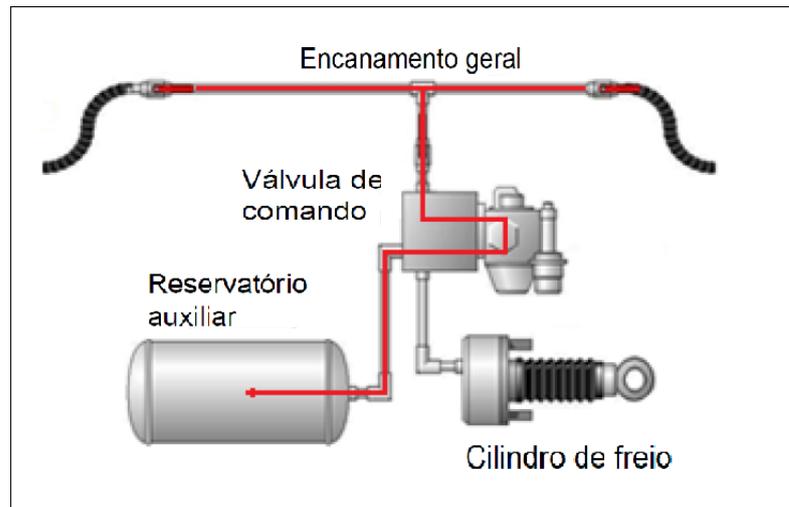
Figura 2 – Representação esquemática do sistema de freio a ar automático.



Fonte: Borba e Bergantini (2011, p. 6).

A válvula de controle ficou conhecida também por válvula tríplice, pois apresenta as funções de carregamento do sistema, aplicação e alívio do freio. Durante o carregamento o ar comprimido vem do reservatório principal através do encanamento geral e é encaminhado ao reservatório auxiliar pela válvula de comando, como mostra a Figura 3. O ar comprimido utilizado durante a frenagem passou então a ficar localmente armazenado, aumentando a velocidade de acionamento dos freios. Os reservatórios auxiliares precisam ser recarregados no início da operação e após o freio ser utilizado (BORBA; BERGANTINI, 2011, p. 7).

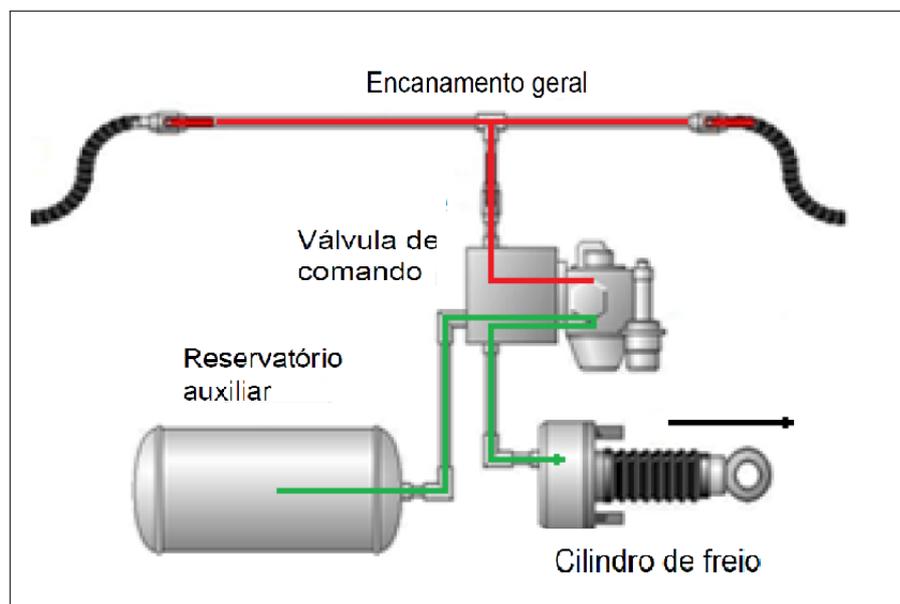
Figura 3 – Representação esquemática do carregamento do sistema de freio.



Fonte: Borba et al. (2008, p. 14).

A aplicação do freio se dá pela redução da pressão no encanamento geral. O maquinista utiliza o manipulador de freio para executar essa redução. A válvula controladora interrompe o fluxo que iria para o reservatório auxiliar, conectando o reservatório ao cilindro de freio, conforme Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática da aplicação do freio.



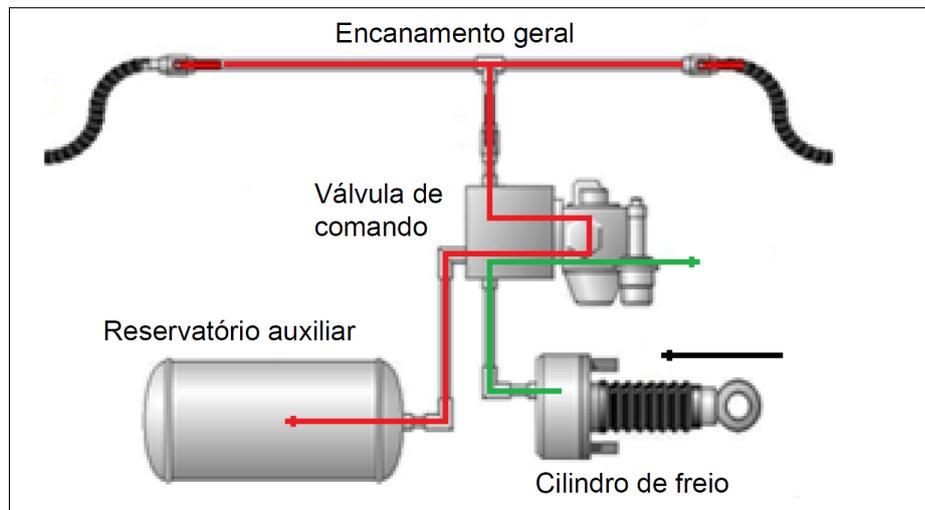
Fonte: Borba et al. (2008, p. 15).

Durante a aplicação no sistema a Ar Automático, o ar comprimido do encanamento geral passou a ser utilizado apenas para propagar o sinal de freagem para os vagões, pois o ar utilizado para o mesmo já se encontra nos reservatórios auxiliares. Esse procedimento aumentou a velocidade de resposta do sistema, diminuindo o tempo necessário para a aplicação dos freios ocorrer nos vagões, e também aumentou a

segurança, pois ao acontecer o rompimento do encanamento geral, a válvula percebe a queda de pressão e os freios são acionados automaticamente.

O alívio dos freios ocorre ao aumentar a pressão do encanamento geral. Esse aumento de pressão faz com que a válvula libere o compartimento do cilindro de freio, fazendo com que o ar comprimido seja descarregado para a atmosfera, e as sapatas de freio parem de exercer força nas rodas, conforme Figura 5. O encanamento geral então é reconectado aos cilindros auxiliares, recarregando-os com ar comprimido para o próximo uso dos freios.

Figura 5 – Representação esquemática do alívio do freio.



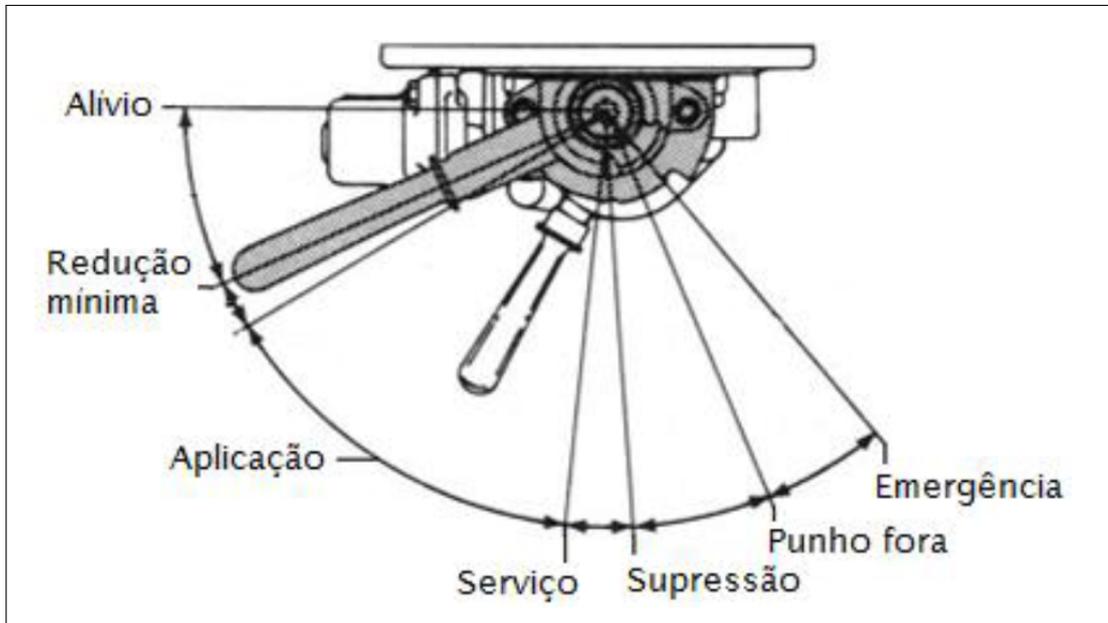
Fonte: Borba et al. (2008, p. 16).

O manipulador automático do freio, apresentado na Figura 6, admite seis posições distintas que fazem parte da operação do freio (FCA, 2003, p. 12):

- Alívio: a posição de alívio é assumida para realizar o carregamento do sistema de freio (encanamento geral e conseqüentemente os cilindros auxiliares) durante o início da operação e o recarregamento após o uso dos freios, acarretando no alívio do sistema;
- Redução mínima: a redução mínima retira de 6 a 8 psi de pressão do encanamento geral, que gera uma aplicação de 6 a 12 psi no cilindro de freio;
- Zona de Aplicação: nessa área é possível realizar a redução de 10 a 25 psi do encanamento geral, sendo a redução máxima conhecida como aplicação total;
- Supressão: Efetua uma aplicação total de serviço e serve para anular uma aplicação de freio originada pelo controle de segurança do maquinista (Homem morto ou sobre velocidade);
- Punho fora: permite a retirada do manipulador, sendo utilizada em operações remotas (locomotivas comandadas em sistemas de controle remoto);
- Emergência: ao acionar a emergência, o encanamento geral sofre uma redução abrupta de pressão até chegar a 0 psi, iniciando a aplicação dos freios em estado

de emergência.

Figura 6 – Representação esquemática das posições do manipulador automático de freio.

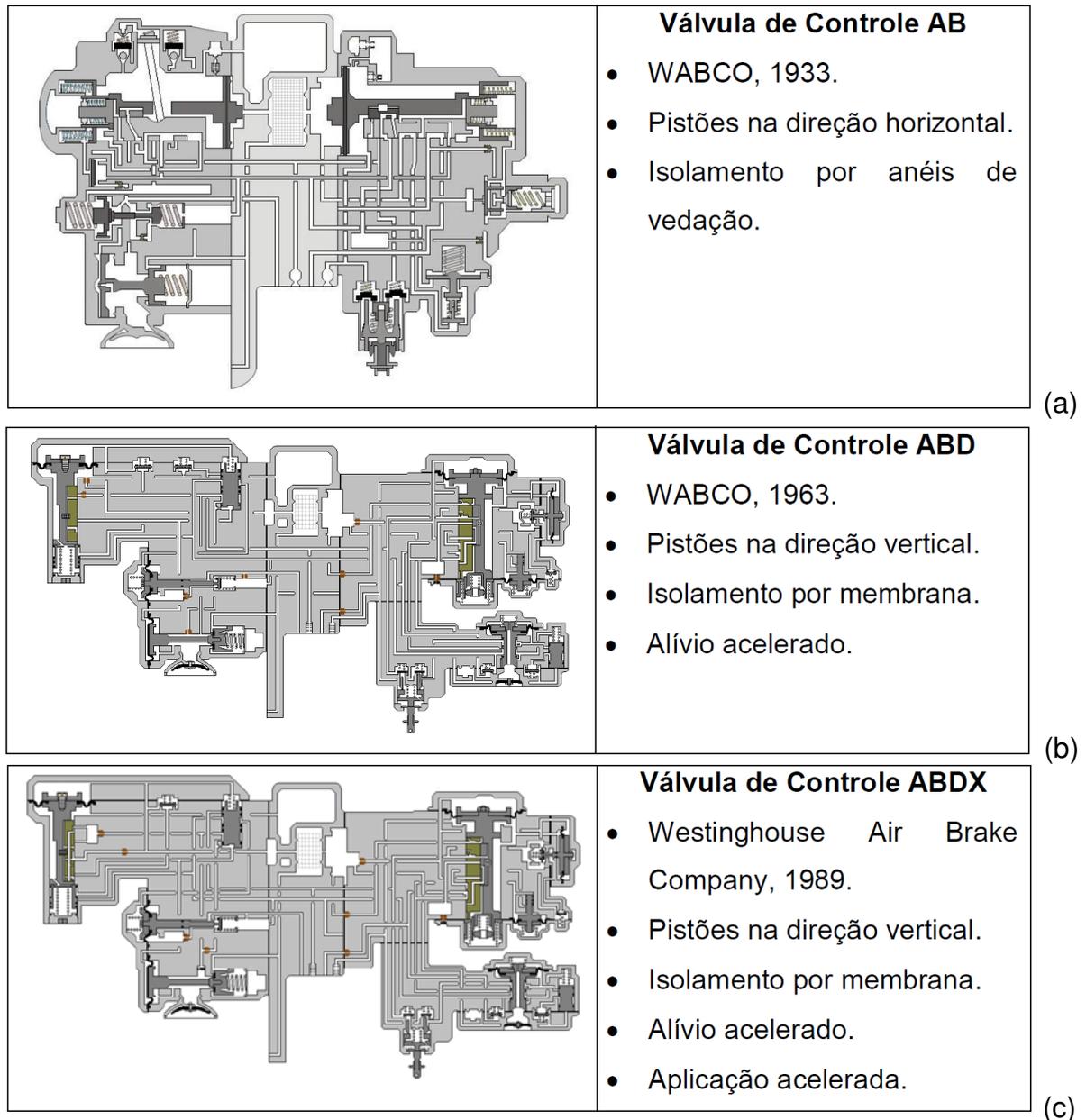


Fonte: Borba (2009, p. 8).

2.2 Válvulas de Controle

As funções das válvulas de controle são a interpretação do sinal pneumático enviado pelo encanamento geral e a realização da operação de frenagem escolhida. As válvulas AB, ABD e ABDX mencionadas nesse trabalho são fabricadas pela Westinghouse Air Brake Company (WABCO). A Figura 7 apresenta as representações esquemáticas das válvulas AB (Figura 7a), ABD (Figura 7b) e ABDX (Figura 7c).

Figura 7 – Representação esquemática das válvulas de controle. (a) Válvula AB, (b) Válvula ABD e (c) Válvula ABDX.



Fonte: Ribeiro (2017, p. 29).

As válvulas AB (Figura 7a) entraram no mercado em 1933, e atualmente, representam menos de 10% da frota de vagões de carga. O recurso de serviço rápido foi apresentado pela primeira vez nessa válvula, fazendo com que a pressão no encanamento de freio seja aliviada localmente em cada vagão durante a aplicação inicial de serviço, resultando em uma aplicação mais uniforme e leve em todo o trem. Essa válvula executa as funções básicas de carregamento, alívio, aplicação e emergência (BORBA et al., 2008, p. 162).

A válvula AB é composta pela porção de serviço (parte direita) e pela porção de emergência (parte esquerda). Válvulas gaveta controlam o fluxo de ar entre as partes

que se movem, dependendo da diferença de pressão entre os volumes, isoladas por um anel de vedação. A válvula gaveta da porção de serviço atua em todas as operações de frenagem (RIBEIRO, 2017, p. 28).

As válvulas ABD (Figura 7b) foram desenvolvidas em 1963 para desempenhar as mesmas funções da válvula AB, mas com maior confiabilidade e flexibilidade, com menor custos de manutenção. A válvula ABD manteve a porção de emergência (parte esquerda) e a porção de serviço (parte direita). Diferente da versão anterior, em que os pistões eram montados horizontalmente, a ABD traz a montagem vertical, diminuindo a ação das vibrações transmitidas pelas rodas dos vagões durante a viagem e o isolamento que era feito por anéis passa a ser isolamento por membranas, que diminui atrito e vazamento. A válvula ABD apresenta carregamento uniforme, onde os vagões da cauda do trem são carregados (ou recarregados) mais rapidamente que os vagões próximos da locomotiva, que possuem um carregamento retardado (BORBA et al., 2008, p. 164-166).

Essa válvula introduziu o alívio acelerado, sendo mais rápido que a anterior, a partir de uma conexão entre o encanamento geral e o reservatório de emergência nas operações de alívio. A pressão do Encanamento Geral (EG) aumenta mais rápido, permitindo que o sinal de alívio ao longo da composição também seja propagado mais rapidamente (RIBEIRO, 2017, p. 30).

A válvula ABDX (Figura 7c) tem as mesmas funcionalidades da válvula ABD, apresentando ainda a aplicação acelerada. Qualquer aplicação na ABDX o encanamento geral é conectado à atmosfera usando a porção de emergência, até que a pressão se equilibre. Assim, a pressão no EG diminui mais rapidamente, comparando com as antecessoras.

2.3 Operações de Frenagem Ferroviária

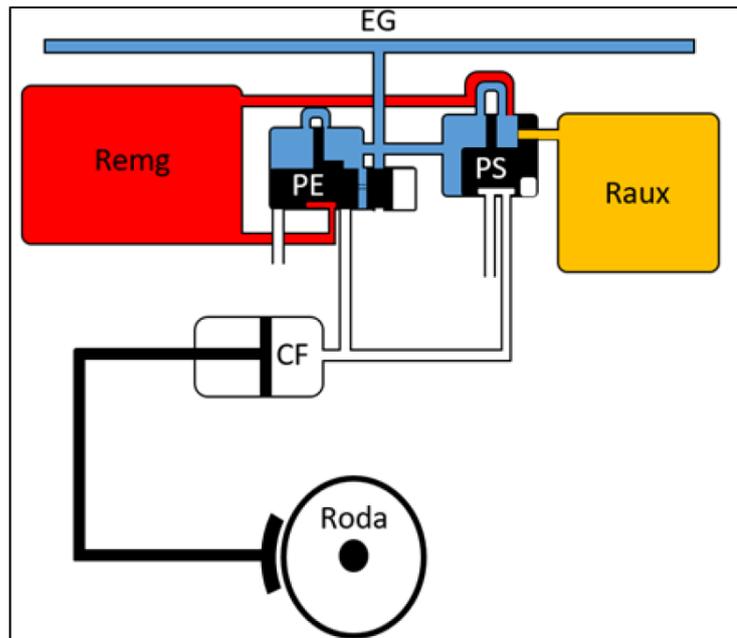
As operações de frenagem são realizadas pelo maquinista com a utilização do manipulador automático de freio, apresentado na Figura 6. O manipulador altera a pressão no encanamento geral e a válvula de controle interpreta essa alteração, permitindo a passagem do fluxo de ar entre os reservatórios e EG ou cilindro de freio, a partir das posições de suas válvulas gaveta em seu interior. As operações de frenagem ferroviária de carregamento aplicação, alívio, emergência e alívio após emergência serão descritas a seguir.

2.3.1 Carregamento do freio

O EG recebe o ar pressurizado do compressor da locomotiva até que todo o encanamento e reservatórios dos vagões estejam na pressão máxima estabelecida dos reservatórios (geralmente 90 psi). A Figura 8 mostra o ar passando do EG (azul)

para o reservatório auxiliar (Raux-amarelo) e de emergência (Remg-vermelho) através da porção de serviço (PS) da válvula. A válvula gaveta da porção de emergência (PE) não permite a passagem de ar do reservatório de emergência para o cilindro de freio (CF), que durante o carregamento fica conectado à atmosfera (RIBEIRO, 2017, p. 31).

Figura 8 – Carregamento do freio na válvula AB.

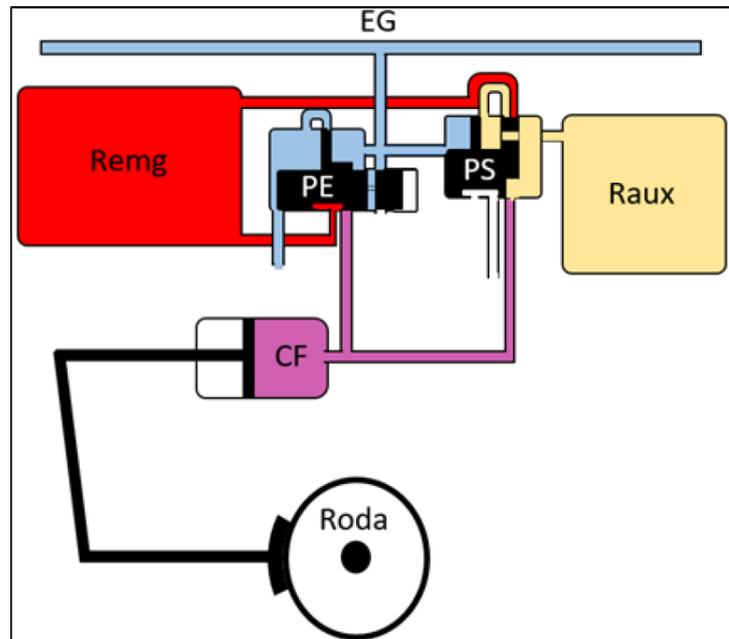


Fonte: Ribeiro (2017, p. 31).

2.3.2 Aplicação do freio

Quando o maquinista aciona o manipulador para a aplicação de freios, uma abertura de ar é aberta no EG, diminuindo sua pressão. Essa diminuição permite ar pressurizado passar do reservatório auxiliar para o cilindro de freio, em todos vagões. A Figura 9 mostra o EG a uma pressão mais baixa (azul claro), movimentando a válvula de gaveta da porção de serviço, conectando o reservatório auxiliar (amarelo claro) ao cilindro de freio (roxo). O cilindro de freio pressurizado faz a timoneria de freio se mover e aplicar força nas sapatas de freio. A pressão do reservatório de emergência se mantém a mesma já que as válvulas gaveta das porções de serviço e emergência bloqueiam as conexões desse reservatório (RIBEIRO, 2017, p. 32).

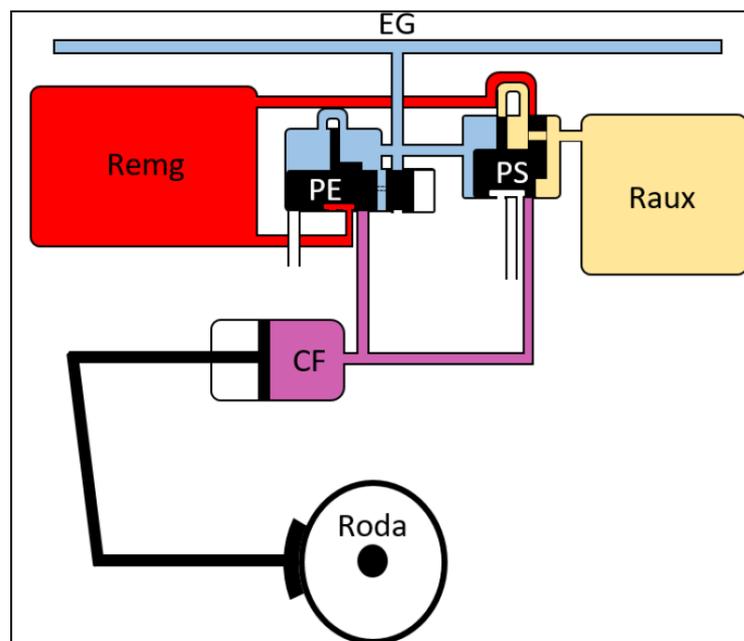
Figura 9 – Aplicação do freio na válvula AB.



Fonte: Ribeiro (2017, p. 32).

A Figura 10 apresenta o recobrimento. A válvula da porção de serviço, se movimenta até ambos os lados dessa válvula estejam em equilíbrio (pressão no EG e no reservatório auxiliar). Essa posição bloqueia a passagem de ar entre o reservatório auxiliar e o EG e o cilindro de freio (RIBEIRO, 2017, p. 33).

Figura 10 – Recobrimento na válvula AB.

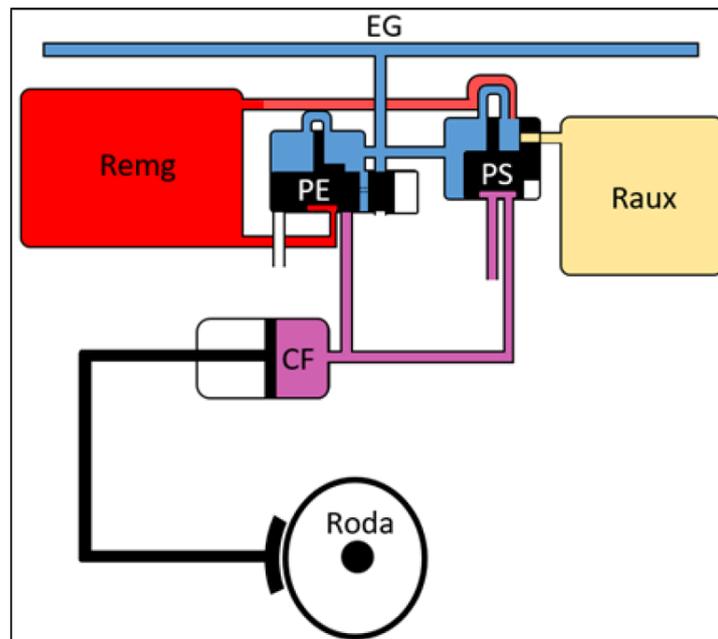


Fonte: Ribeiro (2017, p. 32).

2.3.3 Alívio do freio

O alívio ocorre posteriormente à aplicação. Neste estágio, o EG volta a ser pressurizado para 90 psi, pressurizando, conseqüentemente, o reservatório dos vagões (que já estavam parcialmente pressurizados) e liberando o ar do cilindro de freio para a atmosfera. A Figura 11 apresenta essa operação. O ar passa do EG para os reservatórios por meio da porção de serviço. Como a pressão do reservatório de emergência é maior que a do reservatório auxiliar, esta contribui para o aumento de pressão no auxiliar, até o equilíbrio. A válvula de gaveta bloqueia a passagem do reservatório de emergência para o cilindro de freio, que diminui gradativamente a aplicação dos freios, já que se encontra aberto à atmosfera, e o cilindro volta a posição inicial pelas forças das molas internas do mesmo (RIBEIRO, 2017, p. 34).

Figura 11 – Alívio na válvula AB.



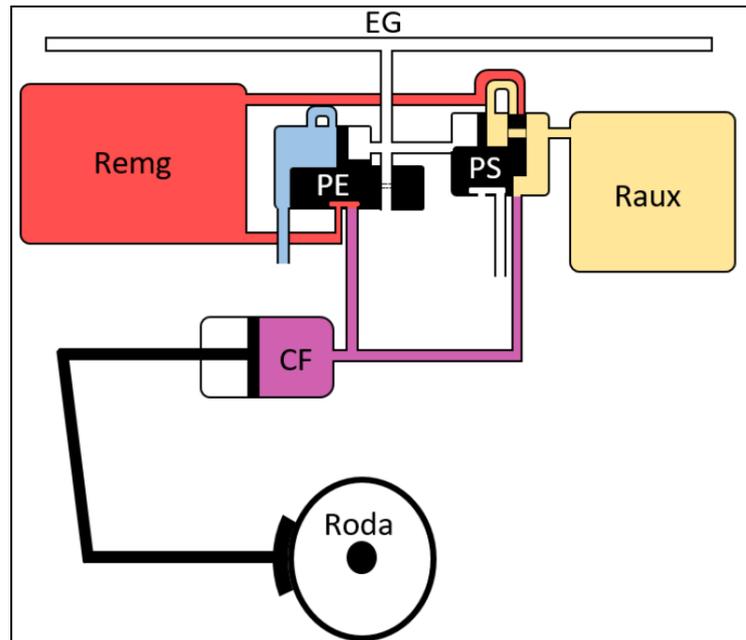
Fonte: Ribeiro (2017, p. 34).

2.3.4 Aplicação de emergência

A aplicação de emergência é acionada a partir da queda rápida de pressão do EG ao ser conectado à atmosfera, liberando sua pressão. Combinando os dois reservatórios (auxiliar e emergência) e liberando o ar comprimido guardado neles para o cilindro de freio, imprimindo uma força de elevada intensidade nas sapatas. O recobrimento não ocorre após a emergência, visto que as pressões dos reservatórios sempre serão maiores que a do EG. A Figura 12 apresenta essa operação. A movimentação rápida da válvula gaveta da porção de emergência faz com que o EG seja conectado a atmosfera, acelerando a propagação do sinal da frenagem de

emergência. A porção de emergência, nessa operação, ainda conecta o reservatório de emergência ao cilindro de freio. A porção de serviço também conecta o reservatório auxiliar ao cilindro de freio, aumentando a pressão máxima obtida no conjunto (RIBEIRO, 2017, p. 35).

Figura 12 – Emergência na válvula AB.



Fonte: Ribeiro (2017, p. 35).

2.3.5 Alívio do freio após emergência

O alívio após emergência se diferencia um pouco do alívio após aplicação. O cilindro de freio não libera a sua pressão à atmosfera, ou seja, ela é transferida de volta para o encanamento geral enquanto esse é recarregado pelo reservatório de alta pressão da locomotiva. O cilindro só é conectado à atmosfera após a pressão do EG ser maior que a pressão no reservatório auxiliar, levando a operação a se comportar de forma similar ao alívio comum.

2.4 Estado da Arte

A literatura é escassa com relação à material bibliográfico ao assunto relacionado com este trabalho. Utilizando a base de dados Scopus[®], foram realizadas duas pesquisas usando palavras-chave relacionadas ao conteúdo deste trabalho. Para a primeira pesquisa, utilizando o conjunto de palavras-chave "train dynamics" e "control valve" e "brake" (tradução do inglês: "dinâmica do trem" e "válvula de controle" e "freio") foram encontrados na pesquisa bibliográfica cinco artigos em periódicos (Anexo A). Para a segunda pesquisa, utilizando o conjunto de palavras-chave "train" e "control valve" e

"brake" (tradução do inglês: "trem" e "válvula de controle" e "freio") foram encontrados na pesquisa bibliográfica dezoito artigos em periódicos (Anexo B). Ao todo, retirando os artigos repetidos por aparecerem nas duas pesquisas, foram encontrados dezoito artigos. Desses, foram escolhidos cinco artigos que mais se encaixam na temática deste trabalho e eles serão apresentados, para finalizar a discussão dos resultados deste trabalho. A dissertação de mestrado "Desenvolvimento de Modelos para Simulação em Tempo Real da Frenagem de Composições Ferroviárias de Carga" (RIBEIRO, 2017) também será brevemente abordada.

O artigo "Simulation of a Railway Pneumatic Brake System" (RIBEIRO et al., 2017) apresenta o estudo do comportamento do fluido (ar comprimido) e das válvulas de freios, para ser possível a modelagem de um sistema de freio pneumático. Um modelo matemático não-linear que descreve o encanamento geral, as válvulas de controle, os reservatórios e os cilindros de freio foi criado a partir da conservação de massa. Usando esse modelo, uma composição de 50 vagões duplos (uma válvula de controle para 2 vagões) foi simulada e comparada com dados reais fornecidos pela Vale S.A., apresentando resultados concordantes. Ainda, uma simulação com 100 vagões duplos é apresentada e comparada com a de 50, observando então um atraso nas operações de carregamento e alívio, condizente com o aumento no número de vagões.

Em "Impact of Longitudinal Train Dynamics on Train Operations: A Simulation Based Study" (SHARMA; KUMAR, 2018), os autores buscam avaliar o impacto das forças de acoplamento (aparelho de choque tração) produzidas durante a frenagem. Devido ao atraso do sinal chegar aos últimos vagões de uma composição, os mesmos geram altas forças de compressão no aparelho choque tração ao empurrarem os vagões da frente. Uma análise dinâmica não-linear foi elaborada para representar as forças nos aparelhos choque tração entre os vagões. A dinâmica longitudinal de diferentes operações de frenagem ferroviária foram estudadas usando análise dinâmica de multicorpos e observaram que a maior força de compressão se encontra no terceiro quarto do trem.

No artigo "A train air brake force model: Car control unit and numerical results" (AFSHARI et al., 2013) os autores buscam a integração de um modelo de freio ferroviário e um modelo não-linear de dinâmica de trem baseada no uso de formulações de coordenadas de trajetória. As equações dos modelos são apresentadas e a relação entre os componentes do sistema de freio pneumático e a dinâmica do trem. Simulações computacionais com diferentes tamanhos de encanamento geral e velocidades iniciais foram consideradas e a resposta dinâmica do trem foi investigada e, a partir da literatura, foram validados.

Em "A Model of Control Valve for Wagons Equipped by k-Blocks" (ARCIDIACONO; CANTONE, 2018) os autores buscam criar um modelo simulacional de válvula de controle para composição que usam sapatas de freio feitas de material

compósito, chamadas de "type k", para o programa TrainDy. O artigo aponta os experimentos realizados e os compara com um teste de campo real. Os parâmetros do sistema utilizando a sapata de material compósito foram mapeados e podem ser usados no programa TrainDy para cálculos de dinâmica longitudinal do trem.

No artigo "The effects of train brake delay time on in-train forces" (NASR; MOHAMMADI, 2010) os autores comentam que em trens longos, o sinal de frenagem demora alguns segundos para chegar aos últimos vagões, levando os mesmos a comprimir a composição, o que leva à forças de alta intensidade nos aparelhos de choque tração. O artigo apresenta o modelo do freio, do aparelhos choque tração, e da resistência ao rolamento. Os resultados são divididos em longos, médios e curtos tempos de atraso da frenagem e os tempos de parada. Para todas simulações, as maiores forças se encontraram no último terço da composição.

Na dissertação de mestrado "Desenvolvimento de Modelos para Simulação em Tempo Real da Frenagem de Composições Ferroviárias de Carga" (RIBEIRO, 2017) o autor buscou desenvolver modelos computacionais representando o comportamento do sistema de freio. Esses sistemas foram modelados baseando-se em válvulas AB, ABD e ABDX e então validados a partir de programas comerciais validados.

Esses artigos abordam principalmente os efeitos que os tempos de atraso do sinal da frenagem e estabilização das operações acarretam na dinâmica longitudinal do trem. Nesse trabalho, o foco se encontra na resposta das válvulas avaliadas e nos tempos de atraso e estabilização de operações ferroviárias. Ambos assuntos se relacionam no estudo da dinâmica ferroviária.

3 METODOLOGIA

As simulações computacionais apresentadas nesse trabalho foram realizadas com o simulador Train-Dynamics Systems 5000 (TDS) da New York Air Brake (NYAB). A NYAB é uma empresa americana que fornece produtos ao setor ferroviário, desde 1890. O TDS pode ser usado para treinamentos, documentação, simulação de eficiência e investigação de acidentes.

O simulador utilizado nesse trabalho se encontra nas dependências da Vale S.A., no porto de Tubarão, em Vitória, Espírito Santo. O TDS faz parte dos simuladores do setor de Engenharia Ferroviária da empresa, localizado no edifício Belesa. A Figura 13 apresenta uma fotografia da tela de monitoramento e dos comandos do simulador utilizado. Na parte superior encontra-se a interface gráfica do simulador em que o mesmo é programado para a simulação computacional desejada, e na parte inferior se encontra o Control Stand, que possui os controladores manuais que simulam as funções encontradas na locomotiva para a movimentação dos trens.

Figura 13 – Simulador TDS 5000.



Fonte: O Autor (2018).

Por ser um programa comercial adquirido por licença, os pacotes de equações

utilizados para as simulações computacionais e os cálculos internos realizados pelo programa não são disponibilizados ao grande público. No entanto, sabe-se que modelos físico-matemáticos estão envolvidos nos códigos computacionais do TDS. Na dissertação de mestrado "Desenvolvimento de Modelos para Simulação em Tempo Real da Frenagem de Composições Ferroviárias de Carga" (RIBEIRO, 2017), o autor desenvolve modelos computacionais que representam o sistema de freio de composições ferroviárias e para isso foi necessário utilizar de relações de fluxo mássico, fatores de correção de fluxo estipulados pela norma ISO 6350 (1989), equação de Clapeyron e sua derivada no tempo, conservação das massas método de Euler para integração, dentre outros princípios físicos e matemáticos.

Como o objetivo desse trabalho envolve a propagação do sinal pneumático do freio e o tempo de acionamento dos cilindros, em situação estacionária, a simulação descreve o trem em trecho uniforme (sem aclave ou declive) e totalmente parado. Para as simulações foi utilizada o modelo de vagão padrão GDE utilizado na Estrada de Ferro Vitória a Minas e a locomotiva diesel-elétrica DASH 9. As válvulas AB, ABD e ABDX foram selecionadas para as simulações computacionais devido a sua aplicabilidade no setor ferroviário. Cada válvula foi simulada em uma composição com uma locomotiva na frente, seguida dos vagões. O número de vagões simulado foi de 50, 100, 150 e 200 vagões para cada válvula. A Tabela 1 exemplifica essas simulações computacionais.

Tabela 1 – Válvulas e quantidade de vagões simuladas.

Válvula	Número de vagões			
AB	50	100	150	200
ABD	50	100	150	200
ABDX	50	100	150	200

Fonte: O Autor (2019).

A Tabela 2 apresenta três operações de frenagem que foram executadas nas simulações computacionais, sendo elas comuns e muito utilizadas na operação de trens, representando a menor e a maior aplicação de freio (sem ser emergência) que o maquinista consegue acionar. A aplicação mínima diminui 6 psi do encanamento geral (EG), a aplicação total diminui 26 psi do EG, e a emergência iguala a pressão do EG à pressão atmosférica, zerando a pressão no mesmo.

Tabela 2 – Operações de frenagem simuladas.

Operação	Pressão final no EG [psi]	Pressão retirada do EG [psi]
Mínima	84	6
Total	64	26
Emergência	0	90

Fonte: O Autor (2019).

Para se calcular o tempo que as válvulas levam para executar totalmente a operação requerida pelo maquinista, ou seja, até que o sistema entre no regime permanente, sem ocorrer variações de pressão nos seus componentes, foi utilizado o termo estabilização. Os gráficos de estabilização apresentam, em segundos, o tempo necessário desde a aplicação da operação pelo maquinista até o último vagão da composição não sofrer alterações em suas pressões, ou seja, quanto tempo leva para a composição toda entrar em regime permanente. Esse dado representa a agilidade da válvula em executar totalmente os comandos requeridos.

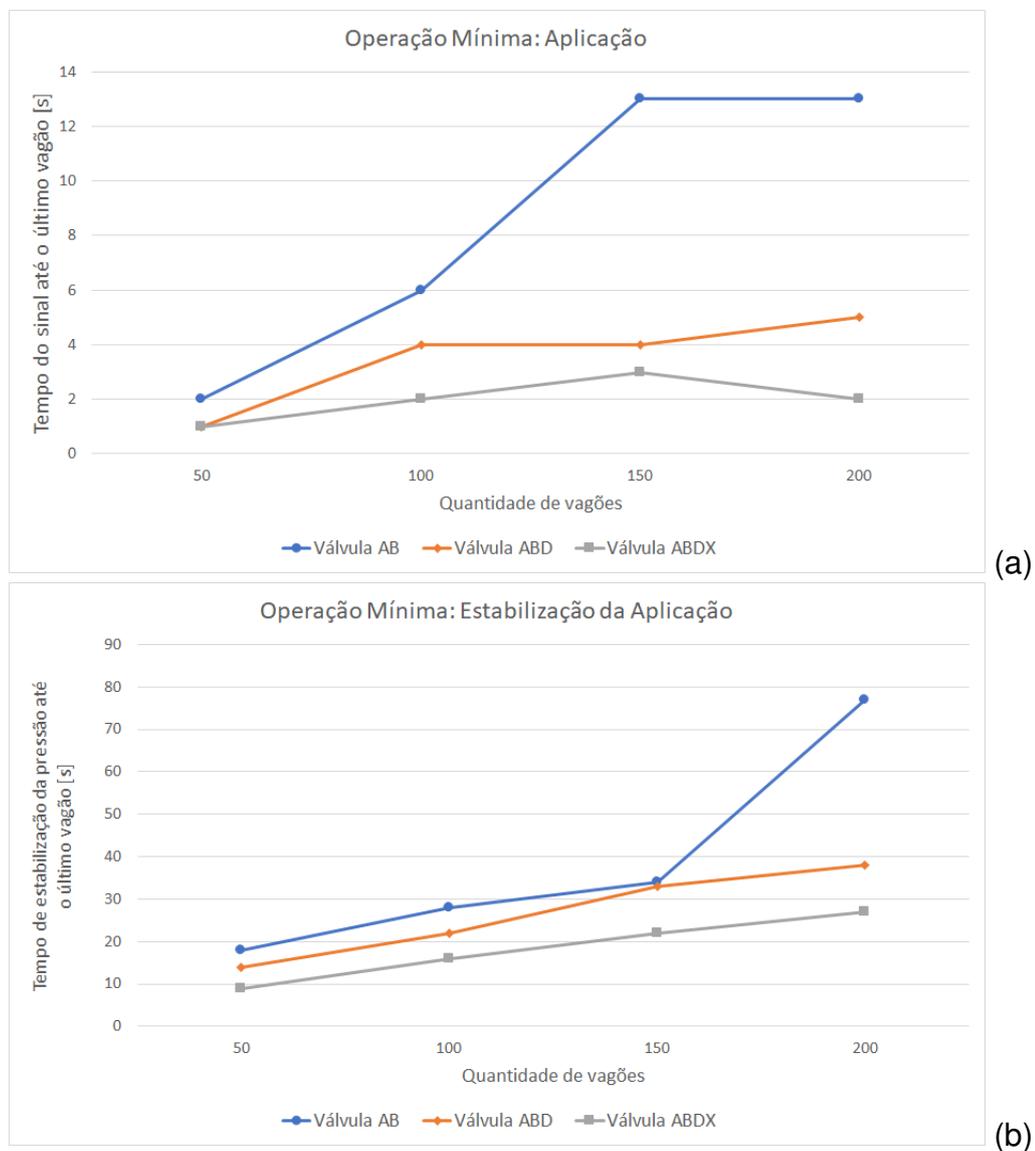
O TDS 5000 oferece a exportação dos dados simulados em arquivos csv. Para esse trabalho, foram escolhidas os seguintes dados a serem analisados: Tempo de simulação e as pressões na locomotiva, último vagão e vagão intermediário do EG, reservatório auxiliar, cilindro de freio e reservatório de emergência. A partir desses dados, foi calculado o tempo do sinal das operações chegarem ao último vagão das composições e o tempo de estabilização das pressões até o último vagão após executar uma operação de frenagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Operação Mínima

A Figura 14 apresenta os gráficos do tempo do sinal até o último vagão em função do número de vagões, sendo em (a) a Operação Mínima para a situação de aplicação, e em (b) a Operação Mínima para a situação de estabilização da aplicação.

Figura 14 – Resultados da Operação Mínima: (a) Aplicação e (b) Estabilização.



Fonte: O Autor (2019).

Cabe ressaltar que o tempo do sinal corresponde a primeira redução de

pressão do encanamento geral (EG). A Operação Mínima para situação de aplicação compreende a redução da pressão do EG de 90 psi para 84 psi, enquanto que, a Operação Mínima de estabilização da aplicação compreende o intervalo de tempo necessário para que as pressões dos componentes dos vagões entrem no regime permanente de atuação, ou seja, sem ocorrer variação da pressão nos componentes.

Os resultados para o tempo do sinal até o último vagão apresentados nos gráficos, Figura 14(a) e (b), indicam um comportamento crescente em função da quantidade de vagões, para as Operações Mínimas de aplicação e estabilização da aplicação.

No entanto, o maior acréscimo para ambas as operações mínimas é dado para a válvula de controle AB. Neste caso, percebe-se que o aumento de tempo que ocorre para composições com mais de 100 vagões apresenta crescimento muito expressivo, notado pela inclinação da linha de tendência do gráfico. Para as válvulas ABD e ABDX, o aumento do número de vagões não apresenta aumento no tempo tão expressivo quanto a válvula AB. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos na Operação Mínima em aplicação e estabilização da aplicação, para o caso mais crítico simulado, 200 vagões.

Tabela 3 – Resultados da aplicação da Operação Mínima para 200 vagões.

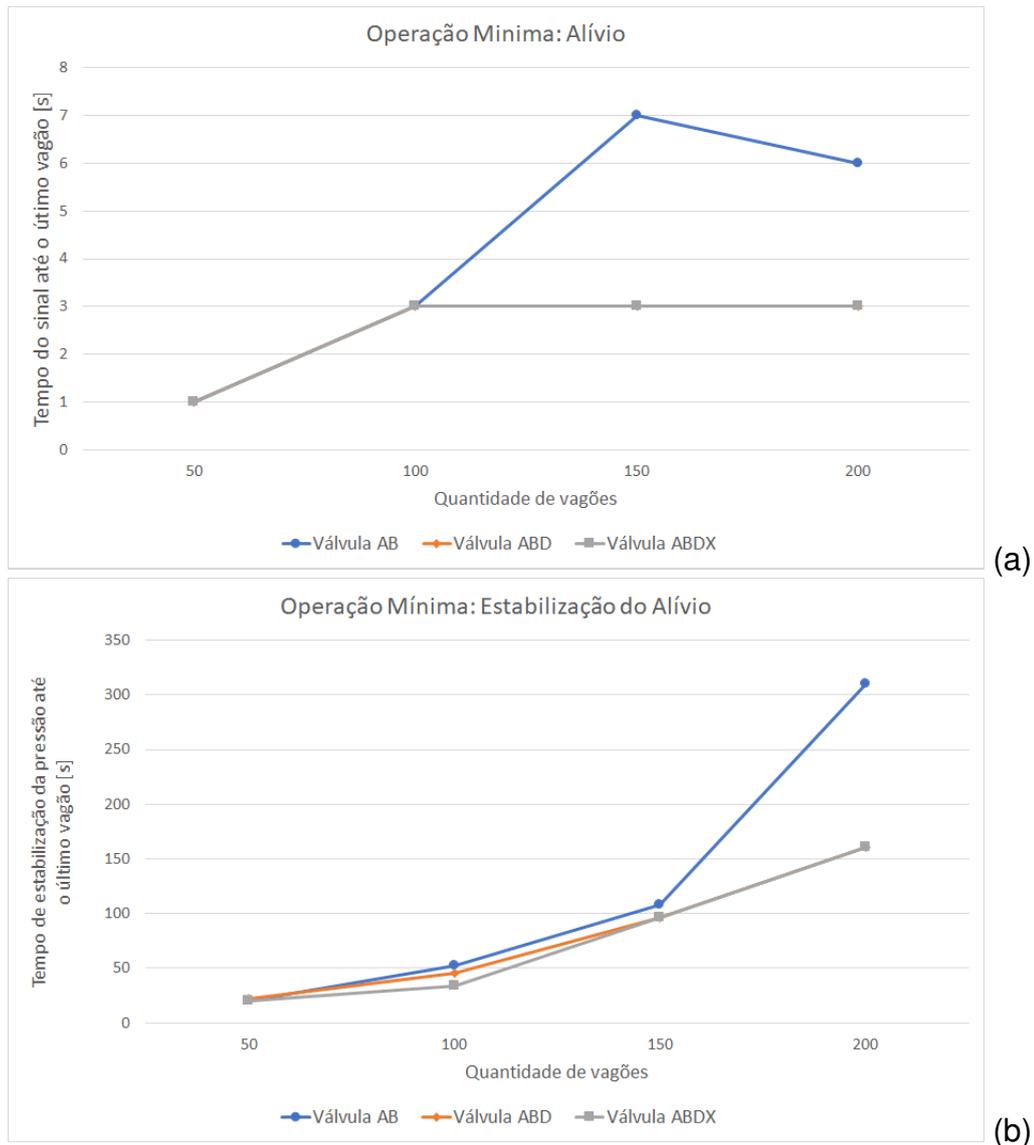
Válvula de controle	Tempo do sinal até o último vagão [s]	Tempo de estabilização da pressão até o último vagão [s]
AB	13	77
ABD	5	38
ABDX	2	27

Fonte: O Autor (2019).

Com esses dados é possível observar que o tempo do sinal para chegar no vagão de número 200, após a aplicação para a válvula AB, é 160% (2,6 vezes) maior que da válvula ABD e 550% (6,5 vezes) maior que da válvula ABDX. A válvula ABDX apresenta em sua elaboração, a aplicação acelerada, que conecta o EG à atmosfera usando a porção de emergência, causando uma queda de pressão mais rápida, e portanto, uma aplicação e estabilização mais acelerada. Essa função pode ser notada ao comparar os valores do tempo de estabilização da pressão até o último vagão da válvula ABDX, sendo esses 185% (2,85 vezes) maiores em comparação com a válvula AB e 40% (1,4 vezes) maiores em comparação com a válvula ABD.

A Figura 15 apresenta os gráficos do tempo do sinal até o último vagão em função do número de vagões, sendo em (a) a Operação Mínima para a situação de alívio, e em (b) a Operação Mínima para a situação de estabilização do alívio.

Figura 15 – Resultados da Operação Mínima: (a) Alívio e (b) Estabilização.



Fonte: O Autor (2019).

A Operação Mínima para situação de alívio compreende ao aumento da pressão do EG de 84 psi para 90 psi.

Os resultados para o tempo do sinal até o último vagão apresentados nos gráficos, Figura 15(a) e (b), indicam um comportamento crescente em função da quantidade de vagões, mas mantendo um valor médio após 150 vagões, para a Operação Mínima de aplicação e estabilização da aplicação.

O maior acréscimo para ambas as operações mínimas é dado para a válvula de controle AB. Neste caso, percebe-se que o aumento de tempo que ocorre para composições com mais de 100 vagões. Para as válvulas ABD e ABDX, o aumento do número de vagões não apresenta aumento no tempo para aplicação a partir de 100 vagões. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na Operação Mínima em alívio e estabilização do alívio para o caso mais crítico simulado, 200 vagões.

Tabela 4 – Resultados do alívio da Operação Mínima para 200 vagões.

Válvula de controle	Tempo do sinal até o último vagão [s]	Tempo de estabilização da pressão até o último vagão [s]
AB	6	310
ABD	3	161
ABDX	3	161

Fonte: O Autor (2019).

Nota-se que o tempo do sinal chegar no vagão de número 200 após o alívio é 100% (2 vezes) maior para a válvula AB do que para ambas as válvulas ABD e ABDX. A partir da válvula ABD e a implementação do alívio acelerado, pode-se notar a diferença entre os tempos de alívio e sua válvula antecessora, a válvula AB. Essa função pode ser observada pelos dados, sendo que os valores do tempo de estabilização da pressão até o último vagão, após o alívio para a válvula AB, é 92% (1,92 vezes) maior que ambas a válvulas ABD e ABDX.

4.2 Operação Total

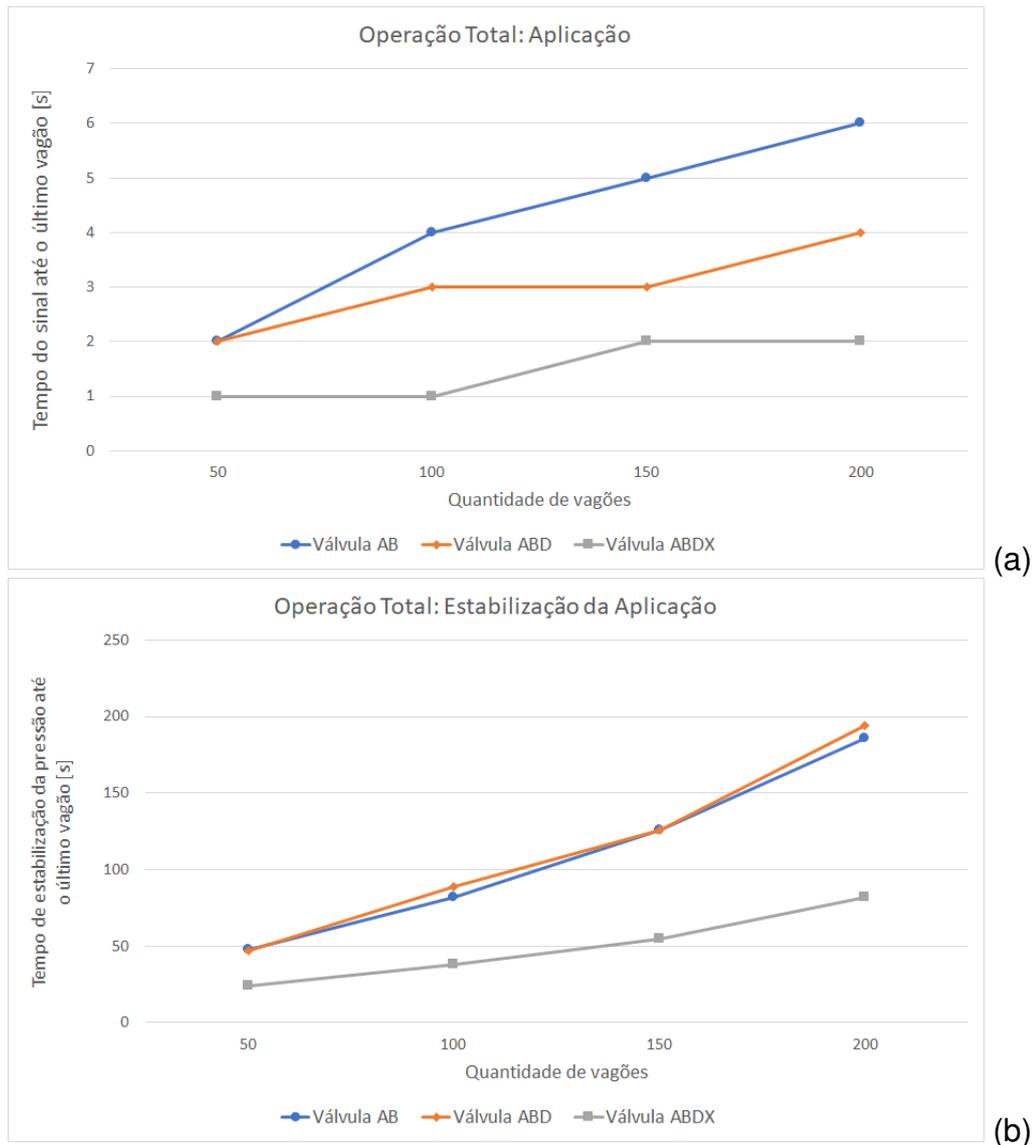
A Figura 16 apresenta os gráficos do tempo do sinal até o último vagão em função do número de vagões, sendo em (a) a Operação Total para a situação de aplicação, e em (b) a Operação Total para a situação de estabilização da aplicação.

A Operação Total para situação de aplicação compreende a redução da pressão do EG de 90 psi para 64 psi.

Os resultados para o tempo do sinal até o último vagão apresentados nos gráficos, Figura 16(a) e (b), indicam um comportamento crescente em função da quantidade de vagões, para a Operação Total de aplicação e estabilização da aplicação.

O maior acréscimo para ambas as operações mínimas é dado para a válvula de controle AB. Ainda para a estabilização da aplicação, as válvulas AB e ABD apresentam comportamento muito semelhante em todas quantidades de vagões simuladas.

Figura 16 – Resultados da Operação Total: (a) Aplicação e (b) Estabilização.



Fonte: O Autor (2019).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na Operação Total em aplicação e estabilização da aplicação para o caso mais crítico simulado, 200 vagões.

Tabela 5 – Resultados da aplicação da Operação Total para 200 vagões.

Válvula de controle	Tempo do sinal até o último vagão [s]	Tempo de estabilização da pressão até o último vagão [s]
AB	6	186
ABD	4	194
ABDX	2	82

Fonte: O Autor (2019).

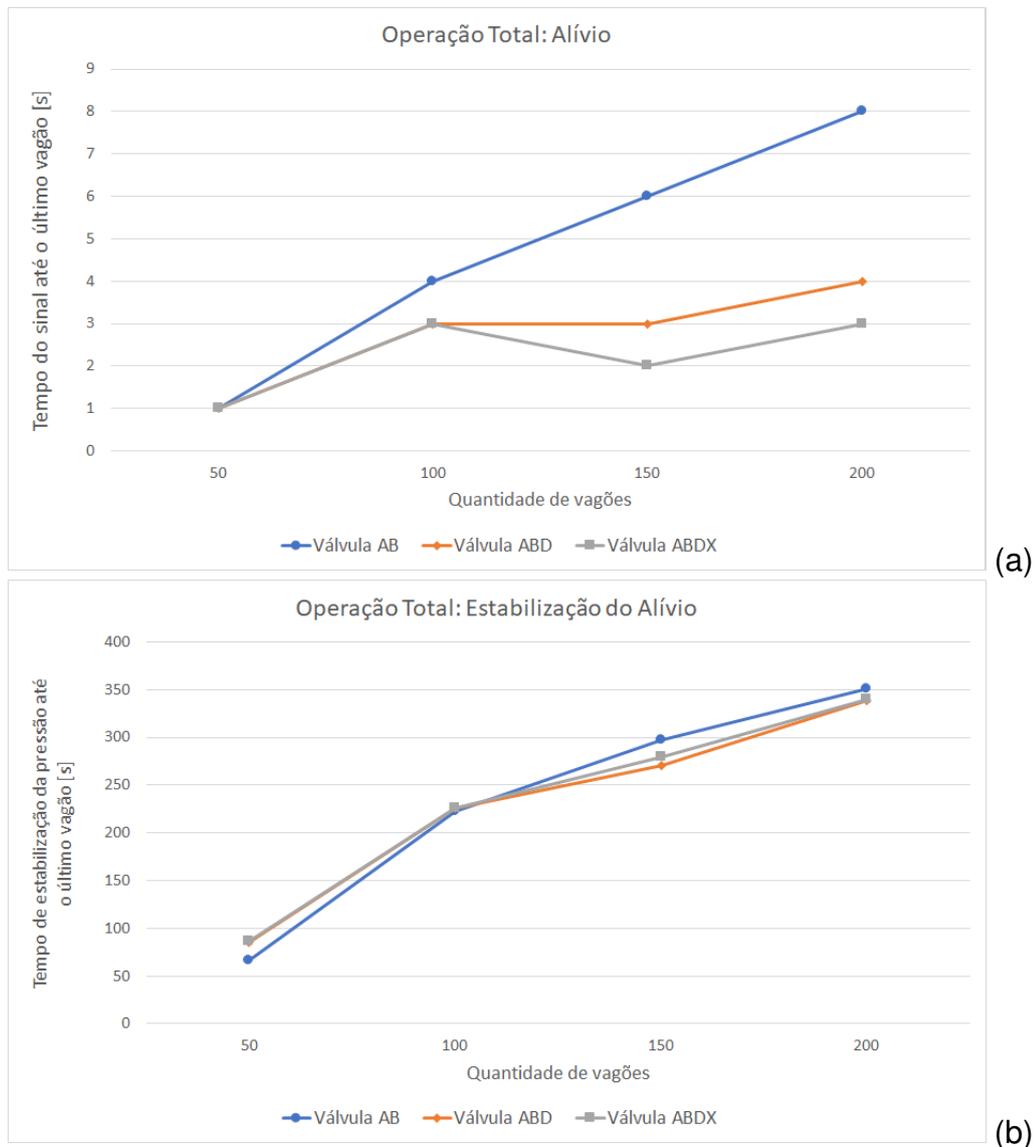
A válvula AB apresenta, tempo do sinal chegar no vagão de número 200 após a aplicação, 50 e 200% (1,5 e 3 vezes) maior que os tempos das válvulas ABD e ABDX,

nessa ordem. O tempo de estabilização da pressão até o último vagão após aplicação é 126% (2,26 vezes) maior para a válvula AB em comparação com a ABDX e 136% (2,36 vezes) maior para a válvula ABD em comparação com a ABDX.

A Figura 17 apresenta os gráficos do tempo do sinal até o último vagão em função do número de vagões, sendo em (a) a Operação Total para a situação de alívio, e em (b) a Operação Total para a situação de estabilização do alívio.

A Operação Total para situação de alívio compreende ao aumento da pressão do EG de 64 psi para 90 psi.

Figura 17 – Resultados da Operação Total: (a) Alívio e (b) Estabilização.



Fonte: O Autor (2019).

Os resultados para o tempo do sinal até o último vagão apresentados nos gráficos, Figura 17(a) e (b), indicam um comportamento crescente em função da quantidade de vagões para a Operação Mínima de aplicação e estabilização da

aplicação. A válvula AB apresenta o maior tempo do sinal até o último vagão, enquanto que para o tempo de estabilização as três válvulas apresentam comportamento similar. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na Operação Total em alívio e estabilização do alívio para o caso mais crítico simulado, 200 vagões.

Tabela 6 – Resultados do alívio da Operação Total para 200 vagões.

Válvula de controle	Tempo do sinal até o último vagão [s]	Tempo de estabilização da pressão até o último vagão [s]
AB	8	351
ABD	4	339
ABDX	3	340

Fonte: O Autor (2019).

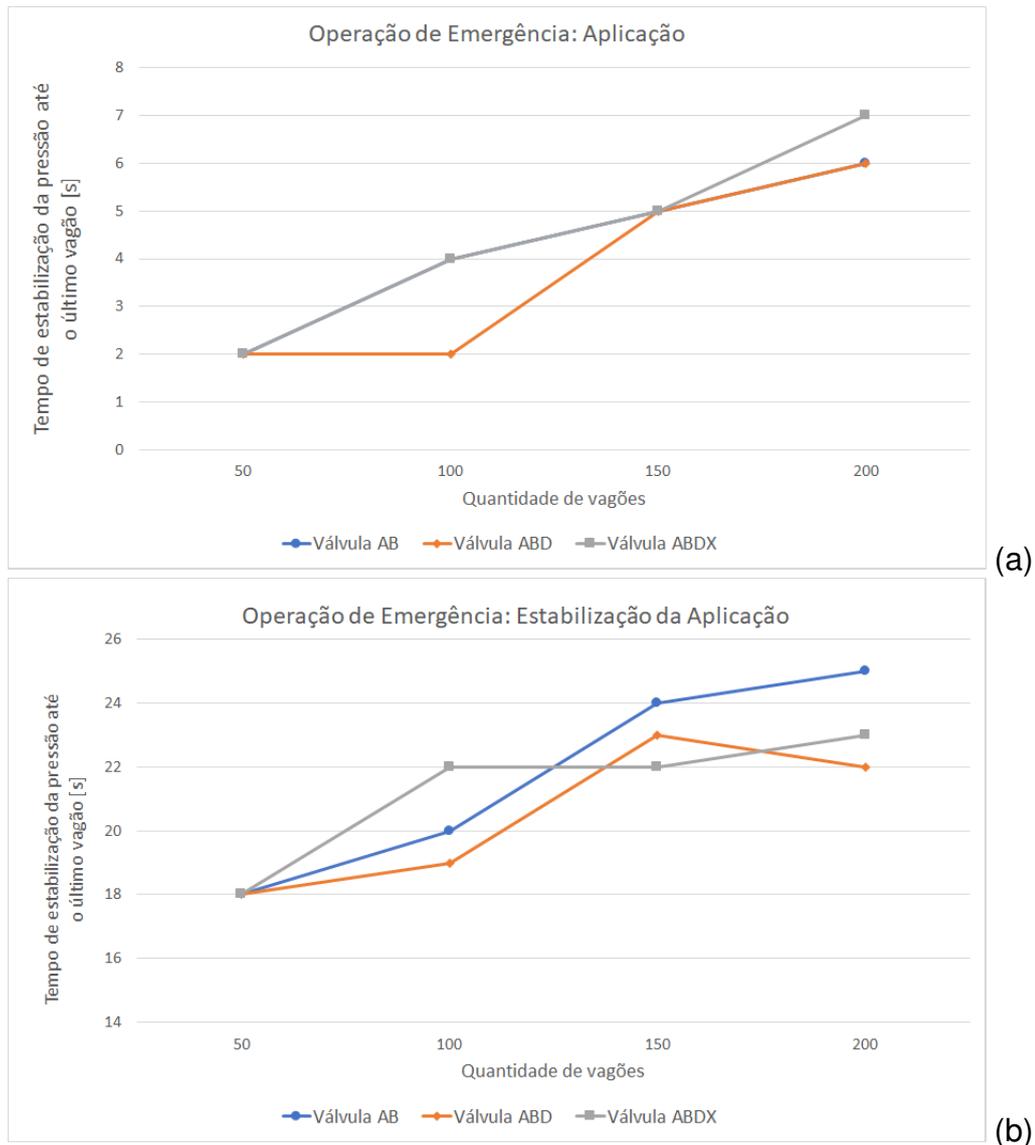
O tempo do sinal chegar no vagão de número 200 após o alívio para válvula AB é 100% (2 vezes) maior do que para a válvula ABD e 166% (2,66 vezes) maior do que para a válvula ABDX. Os tempos das três válvulas para a estabilização após alívio não apresentam diferença notável entre elas.

4.3 Operação de Emergência

A Figura 18 apresenta os gráficos do tempo do sinal até o último vagão em função do número de vagões, sendo em (a) a Operação de Emergência para a situação de aplicação, e em (b) a Operação de Emergência para a situação de estabilização da aplicação.

A Operação de Emergência para situação de aplicação compreende a redução da pressão do EG de 90 psi para 0 psi.

Figura 18 – Resultados da Operação de Emergência: (a) Aplicação e (b) Estabilização.



Fonte: O Autor (2019).

Os resultados para o tempo do sinal até o último vagão apresentados nos gráficos, Figura 18(a) e (b), mostram que para as três válvulas não houve diferença considerável, quanto nas outras operações mencionadas anteriormente. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na Operação de Emergência em aplicação e estabilização da aplicação para o caso mais crítico simulado, 200 vagões.

Tabela 7 – Resultados da aplicação de Emergência para 200 vagões.

Válvula de controle	Tempo do sinal até o último vagão [s]	Tempo de estabilização da pressão até o último vagão [s]
AB	6	25
ABD	6	22
ABDX	7	23

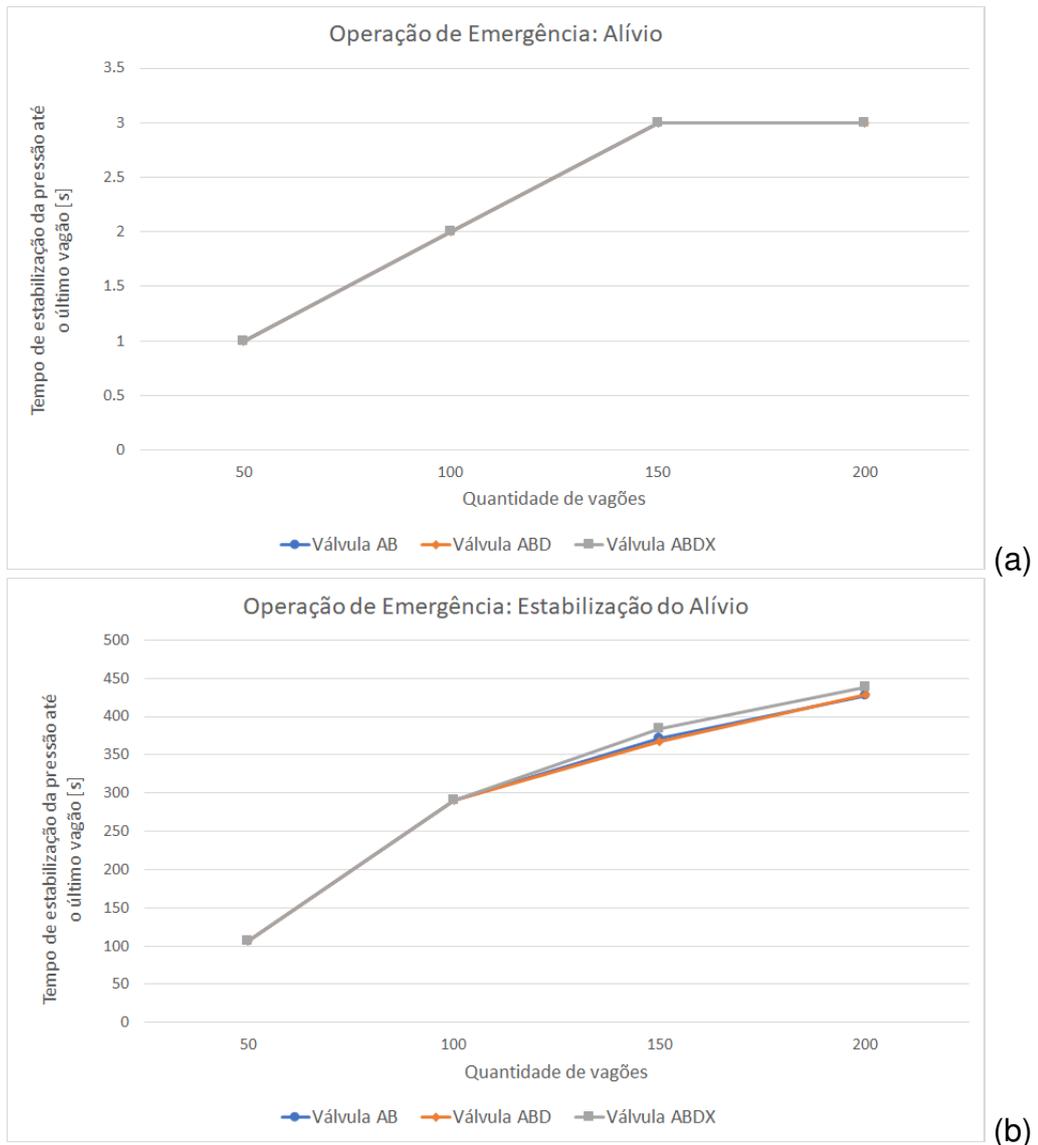
Fonte: O Autor (2019).

Os resultados variam menos de 20% para aplicação e alívio da emergência.

A Figura 19 apresenta os gráficos do tempo do sinal até o último vagão em função do número de vagões, sendo em (a) a Operação de Emergência para a situação de alívio, e em (b) a Operação de Emergência para a situação de estabilização do alívio.

A Operação de Emergência para situação de alívio compreende ao aumento da pressão do EG de 0 psi para 90 psi.

Figura 19 – Resultados da Operação de Emergência: (a) Alívio e (b) Estabilização.



Fonte: O Autor (2019).

Os resultados para o tempo do sinal até o último vagão apresentados nos gráficos, Figura 19(a) e (b), mostram, como no caso anterior, que para as três válvulas não houve diferença tão consideráveis quanto nas outras operações mencionadas anteriormente. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos na Operação de Emergência em alívio e estabilização da alívio para o caso mais crítico simulado, 200 vagões. As diferenças entre as válvulas em ambas operações são pequenas.

Tabela 8 – Resultados do alívio da Operação de Emergência para 200 vagões.

Válvula de controle	Tempo do sinal até o último vagão [s]	Tempo de estabilização da pressão até o último vagão [s]
AB	3	427
ABD	3	429
ABDX	3	439

Fonte: O Autor (2019).

5 CONCLUSÕES

A partir das simulações computacionais realizadas para este trabalho foi possível determinar os tempos de resposta para as operações de frenagem ferroviária mais utilizadas em um trem. As simulações foram realizadas com o programa Train-Dynamics System 5000, da New York Air Brake. As simulações computacionais mostraram a eficiência desses métodos, principalmente para grandes componentes em que testes empíricos são muito dispendiosos.

Utilizando os dados das simulações computacionais, os resultados foram organizados e analisados, para ser possível as comparações entre válvulas e diferentes número de vagões nas composições. O tempo que o sinal levou para percorrer todos os vagões e o tempo que todos os vagões levam para entrar em regime permanente foram obtidos. Os dados foram organizados em forma de gráfico para a melhor entendimento.

Com os resultados organizados em forma de gráfico, foram discutidas as eficiências das válvulas e as melhorias entre suas versões. A válvula AB se mostra a válvula com as respostas mais lentas, sendo 6,5 vezes mais lenta que a válvula ABDX no envio do sinal da aplicação da Operação Mínima com 200 vagões; para a estabilização da aplicação da Operação Mínima em 200 vagões, a válvula AB foi 2,85 vezes mais lenta que a válvula ABDX. No alívio da Operação Mínima as diferenças entre válvulas se mantém, sendo 2 vezes mais lenta que as válvulas ABD e ABDX para enviar o sinal do alívio da Operação Mínima com 200 vagões; e para a estabilização do alívio da operação mínima em 200 vagões, a válvula AB foi 1,92 vezes mais lenta que as válvulas ABD e ABDX.

Na Operação Total o tempo para enviar o sinal da aplicação com 200 vagões para a válvula AB foi 3 vezes maior que a válvula ABDX e para a estabilização do mesmo, a diferença chegou a ser 2,26 vezes maior. Na Operação de Emergência o tempo para enviar o sinal da aplicação com 200 vagões para a válvula AB foi 2,66 vezes maior que a válvula ABDX e para a estabilização do mesmo, a diferença entre elas não é considerável. Foi possível observar que a válvula ABD apresenta melhoria principalmente nos tempos de alívio; já a válvula ABDX apresentou melhoria também nos tempos de aplicação de suas operações.

Para trabalhos futuros recomenda-se a simulação dinâmica das válvulas de controle e as operações de frenagem, para ser possível avaliar os impactos na dinâmica longitudinal do trem, principalmente nas forças exercidas nos aparelhos de choque tração da composição e, conseqüentemente, nas forças laterais.

REFERÊNCIAS

- AFSHARI, A. et al. A train air brake force model: Car control unit and numerical results. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 227, p. 38–55, 2013. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954409712447231?journalCode=pifa>>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- ARCIDIACONO, G.; CANTONE, L. A model of control valve for wagons equipped by k-blocks. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 8, n. 1, p. 285–290, 2018. Disponível em: <http://ijaseit.insightsociety.org/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=1&article_id=4974>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- BORBA, J. L. **Sistemas de freios e equipamentos auxiliares**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.
- BORBA, J. L.; BERGANTINI, M. A. **Dinâmica e frenagem ferroviária**. Vitória: Faculdade Brasileira UNIVIX, 2011.
- BORBA, J. L. et al. **Sistema de Locomotivas e Vagões I – Módulo Sistema de Freios**. Vitória: Valer, 2008.
- COLAVITE, A. S.; KONISHI, F. **A matriz do transporte no Brasil - uma análise comparativa para a competitividade**. Resende, 2015. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/802267.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2019.
- FCA. **Locomotivas e Vagões - Freios**. [S.l.: s.n.], 2003.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MARCONI, M.; LAKANOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2013.
- NASR, A.; MOHAMMADI, S. The effects of train brake delay time on in-train forces. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 224, n. 6, p. 523–534, 2010. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544097JRRT306>>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- PROFILLIDIS, V. **Railway management and engineering**. 3rd. ed. Hampshire: ASHGATE, 2006.
- RIBEIRO, D. et al. Simulation of a railway pneumatic brake system. **2016 18th International Wheelset Congress (IWC)**, p. 105–110, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8068377/>>. Acesso em: 19 jun. 2019.

RIBEIRO, D. F. **Desenvolvimento de Modelos para Simulação em Tempo Real da Frenagem de Composições Ferroviárias de Carga**. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, Campinas, 2017.

SHARMA, S. K.; KUMAR, A. Impact of longitudinal train dynamics on train operations: A simulation based study. **Journal of Vibration Engineering & Technologies**, v. 6, p. 197–203, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs42417-018-0033-4>>. Acesso em: 19 jun. 2019.

TRANSPORTES, S. de Política Nacional de. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT**. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2019.

ANEXO A

O Anexo A apresenta os resultados da pesquisa na base de dados Scopus[®] usando o conjunto de palavras-chave "train dynamics" e "control valve" e "brake" (tradução do inglês: "dinâmica do trem" e "válvula de controle" e "freio") que resultaram em cinco artigos encontrados.

5 document results

Search within results...



Analyze search results

Show all abstracts Sort on: Date (newest)



Refine results

Limit to Exclude

Access type

- Open Access (1) >
- Other (4) >

Year

- 2018 (2) >
- 2013 (1) >
- 2010 (1) >
- 1986 (1) >

Author name

- Afshari, A. (1) >
- Arcidiacono, G. (1) >
- Blaine, D.G. (1) >
- Caldwell, N. (1) >
- Cantone, L. (1) >

View more

Subject area

- Engineering (5) >
- Agricultural and Biological Sciences (1) >
- Computer Science (1) >
- Physics and Astronomy (1) >

Document type

Source title

Publication stage

Keyword

Affiliation

Funding sponsor

- All
- Export
- Download
- View citation overview
- View cited by
- Save to list
- ...
-
-
-

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 1	Impact of longitudinal train dynamics on train operations: A simulation-based study	Sharma, S.K., Kumar, A.	2018	Journal of Vibrational Engineering and Technologies 6(3), pp. 197-203	5
	View abstract <input type="button" value="Capes-BR"/> View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 2	A model of control valve for wagons equipped by k-blocks Open Access	Arcidiacono, G., Cantone, L.	2018	International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology 8(1), pp. 285-290	3
	View abstract <input type="button" value="Capes-BR"/> View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 3	A train air brake force model: Car control unit and numerical results	Afshari, A., Specchia, S., Shabana, A.A., Caldwell, N.	2013	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 227(1), pp. 38-55	11
	View abstract <input type="button" value="Capes-BR"/> View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 4	The effects of train brake delay time on in-train forces	Nasr, A., Mohammadi, S.	2010	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 224(6), pp. 523-534	53
	View abstract <input type="button" value="Capes-BR"/> View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 5	AAR UNDESIRED EMERGENCY STUDY.	Carlson, Frederick G., Blaine, David G.	1986	American Society of Mechanical Engineers (Paper)	0
	View abstract <input type="button" value="Capes-BR"/>				

Display: 20 results per page

- Country/territory 
- Source type 
- Language 

Limit to Exclude

[Restore original settings](#)

[↗ Export refine](#)

About Scopus

- [What is Scopus](#)
- [Content coverage](#)
- [Scopus blog](#)
- [Scopus API](#)
- [Privacy matters](#)

Language

- [日本語に切り替える](#)
- [切换到简体中文](#)
- [切换到繁體中文](#)
- [Русский язык](#)

Customer Service

- [Help](#)
- [Contact us](#)

ELSEVIER

[Terms and conditions ↗](#) [Privacy policy ↗](#)

Copyright © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.
We use cookies to help provide and enhance our service and tailor content. By continuing, you agree to the use of cookies.

 RELX

ANEXO B

O Anexo B apresenta os resultados da pesquisa na base de dados Scopus[®] usando o conjunto de palavras-chave "train" e "control valve" e "brake" (tradução do inglês: "trem" e "válvula de controle" e "freio") que resultaram em dezenove artigos encontrados.

19 document results

Search within results...



Analyze search results

Show all abstracts Sort on: Date (newest)



Refine results

Limit to Exclude

Access type ⓘ

- Open Access (2) >
- Other (17) >

Year

- 2018 (2) >
- 2017 (1) >
- 2015 (1) >
- 2013 (1) >
- 2011 (1) >

View more

Author name

- Iler, D. (2) >
- Wei, W. (2) >
- Abdol-Hamid, K.S. (1) >
- Afshari, A. (1) >
- Arcidiacono, G. (1) >

View more

Subject area

- Engineering (18) >
- Computer Science (2) >
- Physics and Astronomy (2) >
- Agricultural and Biological Sciences (1) >
- Environmental Science (1) >

View more

Document type

Source title

Publication stage

<input type="checkbox"/>	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 1	Impact of longitudinal train dynamics on train operations: A simulation-based study	Sharma, S.K., Kumar, A.	2018	Journal of Vibrational Engineering and Technologies 6(3), pp. 197-203	5
	View abstract View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 2	A model of control valve for wagons equipped by k-blocks Open Access	Arcidiacono, G., Cantone, L.	2018	International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology 8(1), pp. 285-290	3
	View abstract View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 3	Simulation of a railway pneumatic brake system	Ribeiro, D.F., Teodoro, I.P., Botari, T., Martins, T.S., Santos, A.A.	2017	Proceedings of 2016 IEEE International Wheelset Congress, IWC 2016 8068377, pp. 105-110	0
	View abstract View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 4	Brake-based stability assistance functions for commercial vehicles (Book Chapter)	Hecker, F.	2015	<i>Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort</i> pp. 1021-1045	1
	View abstract View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 5	A train air brake force model: Car control unit and numerical results	Afshari, A., Specchia, S., Shabana, A.A., Caldwell, N.	2013	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 227(1), pp. 38-55	11
	View abstract View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 6	Variability in natural frequencies of railroad freight car components	Shust, W.C., Iler, D.	2011	Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 3(PART 2), pp. 1273-1286	3
	View abstract View at Publisher Related documents				

- Keyword ▼

- Affiliation ▼

- Funding sponsor ▼

- Country/territory ▼

- Source type ▼

- Language ▼

Limit to Exclude

Restore original settings

[↗ Export refine](#)

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 7	Lost-motion VVA systems for enabling next generation diesel engine efficiency and after-treatment optimization	Schwoerer, J.A., Kumar, K., Ruggiero, B., Swanbon, B.	2010	SAE Technical Papers	15
	View abstract ▼ Capes-BR View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 8	Vibration response modes and severity rating for freight car appliances	Shust, W., Iler, D.	2010	Proceedings of the ASME Joint Rail Conference 2010, JRC2010 2, pp. 7-16	0
	View abstract ▼ Capes-BR View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 9	The effects of train brake delay time on in-train forces	Nasr, A., Mohammadi, S.	2010	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 224(6), pp. 523-534	53
	View abstract ▼ Capes-BR View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 10	The simulation model of KZ1 control valve and the simulation study on train braking performance	Wei, W., Liu, T., Zhang, J.	2010	Zhongguo Tiedao Kexue/China Railway Science 31(1), pp. 105-110	4
	View abstract ▼ Related documents				
<input type="checkbox"/> 11	Simulation of a freight train brake system with 120 valves	Wei, W., Lin, Y.	2009	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 223(1), pp. 85-92	25
	View abstract ▼ Capes-BR View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 12	Characteristics of Pressure Reduction of Air Brake Apparatus for Rolling Stocks (1st Report, Characteristic Testing Equipment and Experimental Results) Open Access	Kumagai, N., Hasegawa, I., Nagase, K.	1990	Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B 56(529), pp. 2672-2677	0
	View abstract ▼ Capes-BR View at Publisher Related documents				
<input type="checkbox"/> 13	Velocity of pneumo capsules in preparation for loading and unloading	Kosugi, S., Kanagisawa, K.	1987	Journal of Pipelines 6(2), pp. 133-146	0
	View abstract ▼ Related documents				
<input type="checkbox"/> 14	DEVELOPMENT OF PRACTICAL TECHNIQUES FOR THE SIMULATION OF TRAIN AIR BRAKE OPERATION.	Johnson, M.R., Booth, G.F., Mattoon, D.W.	1986	American Society of Mechanical Engineers (Paper)	10
	View abstract ▼ Related documents				

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 15	SIMULATION OF A FREIGHT TRAIN AIR BRAKE SYSTEM.	Abdol-Hamid, K.S., Limbert, D.E., Gauthier, R.G., Chapman, G.A., Vaughn, L.E.	1986	American Society of Mechanical Engineers (Paper)	5
	View abstract <input type="checkbox"/> Related documents				
<input type="checkbox"/> 16	AAR UNDESIRED EMERGENCY STUDY.	Carlson, Frederick G., Blaine, David G.	1986	American Society of Mechanical Engineers (Paper)	0
	View abstract <input type="checkbox"/>				
<input type="checkbox"/> 17	Pneumatic brake control apparatus.	[No author name available]	1981	[No source information available]	0
	View abstract <input type="checkbox"/>				
<input type="checkbox"/> 18	RAILWAY BRAKING: A HISTORY.	Sharpe, A.C.	1979	Engineering (London) 219(9), pp. 1112-1122	2
	View abstract <input type="checkbox"/>				
<input type="checkbox"/> 19	DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE AIR BRAKE SYSTEM	NOMURA Y, MATSUI S, TAKAMI H, (...), IWAKI T, NAKAMURA M	1971	Quart Rep Ry Tech Res Inst 12(1), pp. 41-49	0
	View abstract <input type="checkbox"/>				

Display:
results per page

1

[^ Top of page](#)

About Scopus

[What is Scopus](#)
[Content coverage](#)
[Scopus blog](#)
[Scopus API](#)
[Privacy matters](#)

Language

[日本語に切り替える](#)
[切换到简体中文](#)
[切换到繁體中文](#)
[Русский язык](#)

Customer Service

[Help](#)
[Contact us](#)

ELSEVIER

[Terms and conditions](#) [Privacy policy](#)

Copyright © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

We use cookies to help provide and enhance our service and tailor content. By continuing, you agree to the use of cookies.

 RELX