

FÁBIO DE MOURA TAVARES

**SISTEMA DE FRENAGEM DOS TRENS SÉRIES 7000, 7500 E
8000 – MEMORIAL DE CÁLCULO EM CONDIÇÃO NORMAL E
DEGRADADA**

SÃO PAULO

2016

FÁBIO DE MOURA TAVARES

**SISTEMA DE FRENAGEM DOS TRENS SÉRIES 7000, 7500 E
8000 – MEMORIAL DE CÁLCULO EM CONDIÇÃO NORMAL E
DEGRADADA**

Trabalho de conclusão apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo, curso de pós-graduação “Latu-
senso” em Tecnologia Metroferroviária,
desenvolvido no âmbito do Programa de
Educação Continuada em Engenharia –
PECE.

Área de Concentração:

Sistemas de Transporte, Grupo de Análise
de Segurança e Confiabilidade Aplicada.

Orientador:

Prof. Dr. Rodolfo Molinari

SÃO PAULO

2016

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador Prof. Dr. Rodolfo Molinari, pela dedicação, paciência e ajuda com as diversas sugestões apresentadas;

A CPTM, pela importante iniciativa em proporcionar o curso de especialização, sem o qual não estaria vivenciando este momento único, de grande valia para o aprimoramento e engrandecimento de minha carreira profissional e pessoal.

RESUMO

Com a intenção de otimizar a operação nas linhas da CPTM, minimizando o impacto das falhas nos trens durante as viagens, foi estudado o comportamento do sistema de frenagem dos trens série 7000, 7500 e 8000.

Estas séries de trens são formadas por 8 carros e possuem o recurso de manter a taxa de frenagem nominal ($1,1\text{m/s}^2$), caso ocorra avaria nas controladoras de freio em 2 carros.

Atualmente, quando ocorre avaria em uma terceira controladora de freio, o trem prossegue viagem até a próxima estação, desembarca os passageiros e é deslocado à oficina mais próxima para reparos com velocidade de 20km/h.

Neste estudo foi calculado a distância de parada, estando o trem nas velocidades 20, 40, 60, 80 e 90km/h para o caso de avaria numa terceira controladora de freio.

Palavras-chave: CPTM. Freio. Trens. Segurança.

ABSTRACT

In order to optimize the operation on the lines of CPTM, minimizing the impact of failures on the trains during travel, it was verified the braking system behavior of trains series 7000, 7500 and 8000.

These trains series are formed by 8 cars and they have the ability to maintain the nominal braking rate ($1.1 \text{ m} / \text{s}^2$), in the event of malfunction in the brake controller in 2 cars.

Nowadays, when failure occurs in a third brake controller, the train continues journey to the next station, disembark passengers and it is moved to the nearest workshop for repairs with a speed of $20 \text{ km} / \text{h}$.

This study calculated the stopping distance with the train at speeds 20, 40, 60, 80 and $90 \text{ km} / \text{h}$ in case of failure in a third brake controller.

Keywords: CPTM . Brake. Trains. Safety.

LISTA DE TERMOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Blocos de Via	Divisão da via em seções ou blocos. Cada bloco é protegido por um sinal localizado na sua entrada, são utilizados para garantir que há sempre espaço suficiente entre os trens, de modo a permitir que um trem pare antes de chocar-se com o trem à frente
EP	Freio Eletropneumático
ED	Freio Eletropneumático
BCU	Break Control Unit (Unidade Controladora de Freio), esta unidade é responsável pelo controle do freio eletropneumático do trem.
Jerk	Variação brusca na taxa de frenagem,

LISTA DE SÍMBOLOS

n_C	Número de Carros	
n_E	Número de Carros com Freio de Estacionamento	
n_DC	Número de Discos de Freio de Estacionamento por Carro	
D_R	Diâmetro das Rodas	mm
tan (α)	Rampa Máxima	
M	Massa do Trem com Passageiros por Trem	kg
DM	Distribuição da Massa por Carro	
m	Massa por Carro Excluindo Massa Rotativa	kg
m_r	Massa Rotativa por Carro	kg
M_r	Massa Rotativa Total no Trem	kg
W	Massa por Carro Incluindo Massa Rotativa	kg
p_max	Pressão Máxima	bar
A_P	Área Efetiva do Cilindro	cm ²
i_i	Relação Interna	
i_E	Relação do Equipamento	
η_E	Eficiência do Equipamento	
F_Ri	Força de Retorno Interna	N
i_FP	Relação Força/Pressão	N/barr
V_A	Valor Adicional	N
i_G	Relação de Transmissão da Engrenagem	
η_G	Eficiência da Engrenagem	
A_EP	Área Efetiva da Pastilha do Freio a Disco	cm ²
n_s	Número de Freios a Disco por Carro	
r_F	Raio de Fricção	mm
F_E	Força do Freio de Estacionamento	N

μ_{DF}	Coeficiente Dinâmico de Fricção	
μ_{EF}	Coeficiente Estático de Fricção	
t_{10_A}	Tempo de Resposta	s
$(t_{90}-t_{10})_A$	Tempo Acumulado de 10 a 90%	s
F_{D_ED}	Força Média de Desaceleração por Carro Motor	N
F_{D_EDt}	Força de Desaceleração Total no Trem	N
P_C	Pressão no Cilindro de Freio	cm ²
F_F	Força de Freio no Disco	N
F_{D_EP}	Força de Desaceleração por Carro	N
M_F	Massa Freiada por Disco Incluindo Momento de Inércia de Partes Rotativas	kg
F_Dt	Força de Desaceleração no Trem	N
$t(10)$	Tempo de Resposta	s
$(t_{90}-t_{10})$	Tempo Acumulado entre 10 e 90%	s
T_E	Tempo Equivalente de Resposta	s
D_E	Desaceleração Equivalente	m/s ²
v	Velocidade	m/s
$tg(\alpha)$	Rampa	%
D_Et	Desaceleração Equivalente do Trem	m/s ²
T_Et	Tempo Equivalente Total	s
D_M	Desaceleração Média do Trem	m/s ²
S	Espaço Percorrido até a Parada	m

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição de 8 carros	12
Figura 2 - Esforço do freio ED	15
Figura 3 - Esforço do freio ED carro motor e EP carro reboque.....	15
Figura 4 - Esforço do freio ED + EP carro motor e esforço do freio EP carro reboque	15
Figura 5 – Disco de Freio	21
Figura 6 – Método de obtenção t_{10} e t_{90} dada a curva de desaceleração (norma EN13452-1).....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração do trem com freio normal	17
Tabela 2 – Configuração do trem com 3 BCU's isoladas	17
Tabela 3 – Massa do trem com passageiros (kg).....	18
Tabela 4 – Distribuição da massa por carro (%)	18
Tabela 5 – Massa rotativa por carro (kg).....	18
Tabela 6 – Massa do trem incluindo massa rotativa (kg)	19
Tabela 7 – Características do projeto do sistema de frenagem EP.....	19
Tabela 8 – Tempo de atraso e resposta de aplicação de freio EP incluindo limitação jerk.....	21
Tabela 9 – Força de desaceleração ED disponível no trem	23
Tabela 10 – Pressão nos cilindros de freio.....	23
Tabela 11 – Força de freio EP no disco	24
Tabela 12 – Força de desaceleração EP por carro	25
Tabela 13 – Massa freiada por disco.....	26
Tabela 14 – Força de desaceleração combinando os sistemas (ED e EP).....	27
Tabela 15 – Tempo de resposta dos sistemas (ED e EP).....	28
Tabela 16 – Desaceleração equivalente dos sistemas (ED e EP)	28
Tabela 17 – Combinação dos sistemas ED e EP em diversas velocidades para freio normal	29
Tabela 18 – Combinação dos sistemas ED e EP em diversas velocidades para freio 3 BCU's isoladas	30
Tabela 19 – Espaço percorrido até a parada	31

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	DESCRIÇÃO GERAL.....	12
2.1.	FREIO ELETRODINÂMICO	14
2.2.	FREIO ELETROPNEUMÁTICO	14
3.	SISTEMA DE FRENAGEM DOS TRENS SÉRIE 7000, 7500 E 8000.....	14
3.1.	FREIO DE SERVIÇO (1,1 m/s ²).....	15
3.2.	"BLENDING"	16
3.3.	COMPENSAÇÃO DE CARGA.....	16
3.4.	FREIO DE PARADA	16
4.	MEMORIAL DE CÁLCULO.....	17
5.	CONCLUSÃO.....	32
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

Neste memorial de cálculo é mostrada a sequência de cálculo para obter a distância de frenagem em condições de freio normal e degradado para diferentes condições de carga (AW0, AW4 e AW5). No cálculo da distância de frenagem foram empregadas as variáveis listadas em páginas precedentes. Além das variáveis utilizadas nos cálculos apresentados neste trabalho existem outras que podem influenciar na distância de frenagem, como inclinação da via e trilho molhado que não foram consideradas nos cálculos.

2. DESCRIÇÃO GERAL

Os trens das séries 7000, 7500 e 8000 são formados por 8 carros. Sendo quatro carros motores (M) e quatro carros reboques (R).

O arranjo básico da composição dos oito carros é mostrado a figura 1:



Figura 1: Composição de 8 carros

O sistema de freio é composto basicamente por unidades de suprimento de ar, freio direto com unidades de controle pneumáticas, um de freio reboque e alguns equipamentos auxiliares (freio de estacionamento e alimentação da suspensão).

Os trens possuem dois tipos de freio, o eletrodinâmico (ED) e o eletropneumático (EP). Este último possui uma controladora de freio por carro, chamada BCU (Brake Control Unit).

A demanda de freio feita pelo operador é recebida pelo sistema de controle do trem (COSMOS), que envia o sinal para todos os equipamentos de propulsão. Esses equipamentos de propulsão gerenciam a demanda do freio conforme a carga de cada carro.

Dependendo da demanda de freio recebido e do freio eletrodinâmico (ED) disponível, a BCU calcula a demanda do freio de fricção adicional necessária para ser suprida pelo freio eletropneumático (EP).

Esta série de trem foi projetada para conseguir uma taxa de freio de serviço de $1,1\text{m/s}^2$, porém, ainda sendo possível manter esta taxa mesmo com degradação de 25% dos carros, conseguida pelo aumento da pressão de ar nos cilindros de freio.

Nos trens também existem instalados o sistema de ATC (Automatic Train Control) que tem como funções básicas:

- Detecção do código de via, que é injetado nos trilhos pelo equipamento de sinalização de via;
- Indica ao operador o limite de velocidade autorizado (com base no código de via recebido) e a velocidade real do trem;
- Supervisão da velocidade do trem;
- Supervisão da taxa de frenagem do trem;
- Determinação de não movimento.

A distância de parada segura é calculada para o projeto do bloco de via, com base nos parâmetros do trem no pior dos casos, como tempo de acúmulo de freio e taxa de frenagem mínima permitida para o freio de serviço máximo. A distância de parada segura também depende da inclinação média dentro de um determinado bloco.

Os blocos de via são meios de sinalização primária para garantir que há sempre espaço suficiente entre os trens, de modo a permitir que um trem pare antes de chocar-se com o trem à frente. Isso é feito dividindo-se cada via em seções ou "blocos". Cada bloco é protegido por um sinal localizado na sua entrada. Se um bloco é ocupado por um trem, o sinal anterior mostrará um aspecto vermelho, avisando que o trem que vem atrás deve parar. Se houver um bloco livre à frente o sinal posterior irá mostrar um aspecto amarelo e se houver dois blocos livres a frente o sinal irá mostrar o aspecto verde.

Se o sistema de ATC detectar um sinal de via que permite uma velocidade menor que a atual, este avisa ao operador que a velocidade deve ser reduzida e caso o operador não reduza a velocidade, este sistema aplica freio de emergência.

Quando o ATC solicita um freio de emergência por alguma razão, ele monitora a taxa

de frenagem real conseguida e a compara com a taxa de freio de serviço requerida mínimo ($0,825\text{m/s}^2$). Se esta taxa de frenagem é alcançada ou excedida, não é aplicada nenhuma penalização. Se a taxa de frenagem não é alcançada, o ATC reduzirá a velocidade máxima autorizada pela via em 20%, se novamente a taxa não ser alcançada a redução será de 50% e caso isso ocorra pela terceira vez, o ATC declara uma falha do sistema de freio de emergência. Isto, efetivamente, reduz todos os códigos de velocidade autorizados a 0 km/h (zero).

2.1. FREIO ELETRODINÂMICO

Freio resultante de um fenômeno eletromagnético, que ocorre no interior dos motores de tração dos trens, durante uma solicitação de frenagem, decorrente da produção de uma força contrária ao sentido de rotação, causando o efeito de frenagem nas rodas do trem.

2.2. FREIO ELETROPNEUMÁTICO

Freio comandado eletricamente e de atuação pneumática diretamente nos discos de freio acoplados as rodas que tem por objetivo transformar energia cinética em energia térmica através do atrito entre disco e pastilha de freio.

3. SISTEMA DE FRENAGEM DOS TRENS SÉRIE 7000, 7500 E 8000

O freio de serviço eletropneumático (EP) é priorizado pelo freio dinâmico (ED). O sistema permite o uso de freio conjunto em caso de insuficiência do freio dinâmico, como suplementação adicional. Em um escopo maior, o freio pneumático pode substituir o freio dinâmico se ocorrer uma falha.

- Eletrodinâmico
- Eletrodinâmico + Eletropneumático ("blending")
- Eletropneumático

Na figura 2, indica-se a representação gráfica caso o freio ED ser capaz de suprir todo o esforço de freio solicitado:

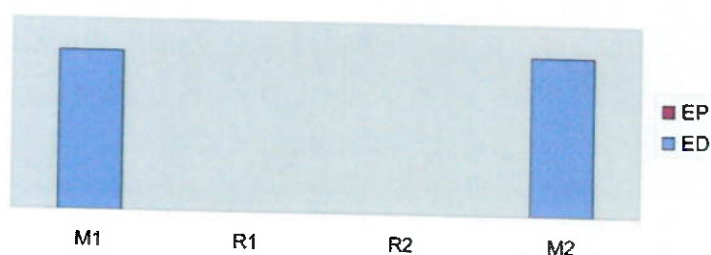


Figura 2 - Esforço do freio ED

Na figura 3, indica-se a representação gráfica caso o freio ED não ser capaz de suprir todo o esforço de freio solicitado:

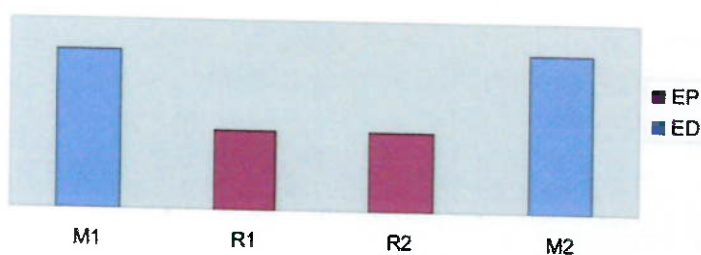


Figura 3 - Esforço do freio ED carro motor e EP carro reboque

Na figura 4, indica-se a representação gráfica caso o freio ED não ser capaz de suprir todo o esforço de freio solicitado:

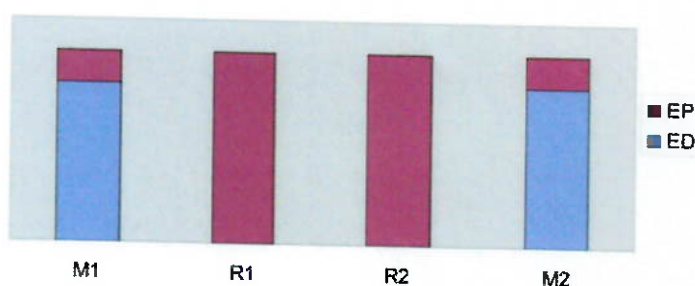


Figura 4 - Esforço do freio ED + EP carro motor e esforço do freio EP carro reboque

3.1. FREIO DE SERVIÇO (1,1 m/s²)

Durante a aplicação do freio de serviço são ativados:

- Freio eletrodinâmico ED;
- Freio eletropneumático de serviço EP (quando o esforço de ED não é suficiente para demanda solicitada);

Na situação de comando de freio ativo, a unidade eletrônica de freio BCU, irá calcular o esforço do freio EP de acordo com:

- Demanda de freio;
- Peso do carro;
- Algoritmo do "blending" (se necessário);
- Esforço do freio ED.

3.2. "BLENDING"

Durante o freio de serviço, o freio EP, caso seja necessário irá complementar o esforço de frenagem, assim teremos freio eletrodinâmico e freio eletropneumático simultaneamente.

3.3. COMPENSAÇÃO DE CARGA

A BCU recebe informação do peso do carro de acordo com os valores lidos do sistema de suspensão quando o trem está parado, e congela este valor quando o trem está em movimento.

Caso seja detectado alguma falha no equipamento de suspensão, a BCU adota como padrão o valor do peso de carro carregado.

3.4. FREIO DE PARADA

Na situação de freio de serviço, quando a velocidade estiver aproximadamente em 10 Km/h, o freio ED perde sua eficiência, desta maneira, o freio EP assume totalmente a frenagem até a parada do trem, ele recebe um sinal alguns instantes antes da perda de eficiência do freio ED e inicia o acréscimo de pressão nos cilindros de freio através de um gradiente programado no software.

4. MEMORIAL DE CÁLCULO

- As condições para os cálculos da distância de frenagem do trem em condição normal (tabela 1) e com 3 BCU's isoladas (tabela 2) estão mostradas abaixo:

Tabela 1 – Configuração do trem com freio normal

	Símbolo	M1	R1	R2	M2
Número de carros	n_C	2	2	2	2
Diâmetro das rodas (mm)	D_R	915	915	915	915

Tabela 2 – Configuração do trem com 3 BCU's isoladas

	Símbolo	M1	R1	R2	M2
Número de carros	n_C	2	0	1	2
Diâmetro das rodas (mm)	D_R	915	915	915	915

Observação: Para os cálculos com 3 BCU's isoladas foram considerados que as avarias aconteceram em 2 carros R1 e em 1 carro R2, conforme tabela 2.

Os cálculos foram realizados para 3 diferentes tipos de carregamento: AW0, AW4 e AW5. Utilizado valores fornecidos no projeto de cada tipo de carro (M1, R1, R2, M2) e somado a área útil do interior de cada carro multiplicado pela quantidade de passageiros por metro quadrado para 3 tipos de carregamento (tabela 3):

- AW0: Carro em tara, sem passageiros;
- AW4: Carro carregado com 8 passageiros / m²;
- AW5: Carro carregado com 10 passageiros / m².

Tabela 3 – Massa do trem com passageiros (kg)

Símbolo	Carga	Massa
M	AW0	348.478
	AW4	528.706
	AW5	565.622

- A distribuição da massa do trem por carro é mostrada na tabela 4:

Tabela 4 – Distribuição da massa por carro (%)

Símbolo	Carga	M1	R1	R2	M2
DM	AW0	13,22%	12,01%	11,55%	13,22%
	AW4	12,79%	12,36%	12,06%	12,79%
	AW5	12,74%	12,40%	12,12%	12,74%

- A tabela 5 mostra os valores de massa rotativa por tipo de carro, valores fornecidos pelo fabricante do trem.

Tabela 5 – Massa rotativa por carro (kg)

Símbolo	M1	R1	R2	M2
m_r	4.607	2.092	2.013	4.607

- A massa do trem somada a massa rotativa é mostrada na tabela 6, para o cálculo foi utilizado a eq.(1):

$$W = M + M_r \quad (1)$$

Tabela 6 – Massa do trem incluindo massa rotativa (kg)

Símbolo	Carga	Massa
W	AW0	375.116
	AW4	555.344
	AW5	592.260

- As características do projeto do trem estão mostradas na tabela 7:

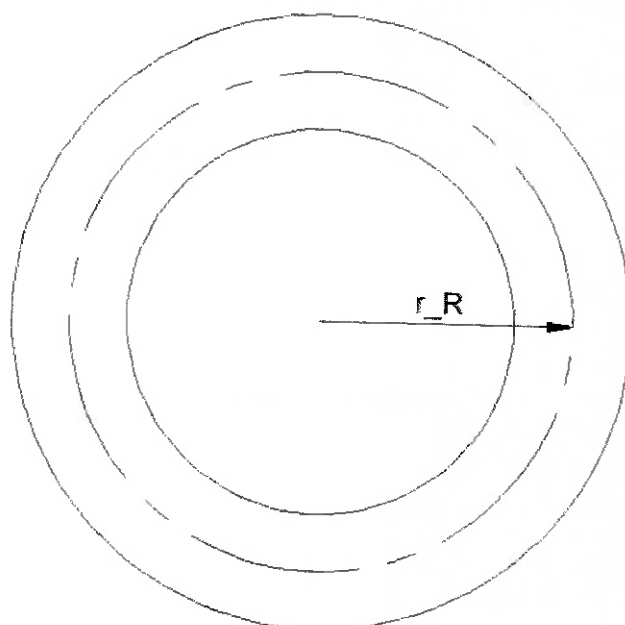
Tabela 7 – Características do projeto do sistema de frenagem EP

	Símbolo	M1	R1	R2	M2
Pressão Máxima (bar)	p_max	6	6	6	6
Área Efetiva do Cilindro (cm²)	A_P	142,7	142,7	142,7	142,7
Relação Interna do Cilindro de Freio	i_i	1	1	1	1
Relação do Equipamento	i_E	8,58	8,58	8,58	8,58
Eficiência do Equipamento	η_E	0,97	0,97	0,97	0,97
Força de Retorno Interna Mola (N)	F_Ri	500	500	500	500
Relação Força/Pressão (N/bar)	i_FP	11.876,35	11.876,35	11.876,35	11.876,35
$i_{FP}=A_P \cdot 10 \cdot i_i \cdot i_E \cdot \eta_E$					

	Símbolo	M1	R1	R2	M2
Valor Adicional (N) $V_A = -F_R i_E \eta_E$	V_A	-4.161,30	-4.161,30	-4.161,30	-4.161,30
Relação de Transmissão da Engrenagem	i_G	1	1	1	1
Eficiência da Engrenagem	η_G	1	1	1	1
Área Efetiva da Pastilha do Freio a Disco (cm ²)	A_EP	800	800	800	800
Número de Freios a Disco por Carro	n_s	8	8	8	8
Raio de Fricção (mm)	r_F	303	303	303	303
Força do Freio de Estacionamento (N)	F_E	57.000	57.000	57.000	57.000
Coefficiente Dinâmico de Fricção	μ_{DF}	0,35	0,35	0,35	0,35
Coefficiente Estático de Fricção	μ_{EF}	0,3	0,3	0,3	0,3

Observação: O valor adicional (V_A) é a força necessária para contrapor a força da mola interna de retorno do cilindro de freio.

O raio de fricção (r_R) é o raio médio do disco de freio como mostra a figura 5.



Disco de Freio

Figura 5 – Disco de Freio

- A tabela 8 mostra o tempo de atraso e resposta de aplicação de freio EP incluindo limitação por Jerk. Dados fornecidos no projeto do trem. Os valores são os mesmos para freio normal e 3 BCU's isoladas. A figura 6 define o método de obtenção t_{10} e t_{90} dada a curva de desaceleração.

Tabela 8 – Tempo de atraso e resposta de aplicação de freio EP incluindo limitação jerk

	Símbolo	ED	EP-M1	EP-R1	EP-R2	EP-M2
Tempo de Atraso (s)	t_{10_A}	274.400	0,4	0,4	0,4	0,4
Tempo de Resposta(s)	$(t_{90}-t_{10})_A$	274.400	1,6	1,6	1,6	1,6

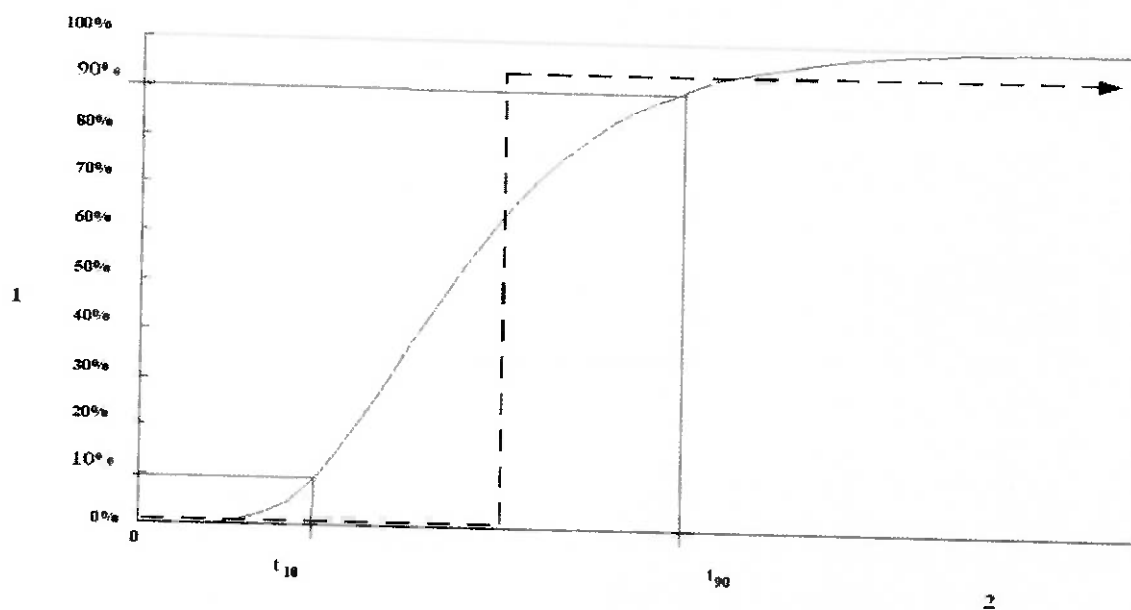


Figura 6 – Método de obtenção t_{10} e t_{90} dada a curva de desaceleração (norma EN13452-1)

Onde:

1- Desaceleração (m/s^2)

2- Tempo (s)

t_{10} - Tempo de Atraso (s)

t_{90} - Tempo de Resposta (s)

- A tabela 9 mostra a força de desaceleração ED disponível por carro motor e disponível no trem que é calculada a partir da eq.(2):

$$F_D_Edt = \sum(F_V_ED * n_C) \quad (2)$$

Tabela 9 – Força de desaceleração ED disponível no trem

	Símbolo		M1	R1	R2	M2
Força Média de Desaceleração por Carro Motor (N)	F_D_ED	AW0	68.600			68.600
		AW4	68.600			68.600
		AW5	68.600			68.600
Força de Desaceleração Total no Trem (N)	F_D_EDt	AW0		274.400		
		AW4		274.400		
		AW5		274.400		

- A tabela 10 mostra os valores das pressões nos cilindros de freio para freio normal e 3 BCU's isoladas, fornecidas pelo projeto do trem.

Tabela 10 – Pressão nos cilindros de freio

	Símbolo	Carga	M1	R1	R2	M2
Freio Normal (bar)	P_C	AW0	0,0	2,2	2,2	0,0
		AW4	1,1	4,0	3,9	1,1
		AW5	1,4	4,3	4,2	1,4
Freio com 3 BCU's Isoladas (bar)	P_C	AW0	0,6	3,1	2,9	0,6
		AW4	2,1	4,1	4,3	2,1
		AW5	2,4	4,3	4,6	2,4

- A tabela 11 mostra os valores da força de freio EP no disco para freio normal e 3 BCU's isoladas calculados a partir da eq.(3):

$$F_F = (P_C * i_FP + V_A) * n_C \quad (3)$$

Tabela 11 – Força de freio EP no disco

	Símbolo	Carga	M1	R1	R2	M2
Freio Normal (N)	F_F	AW0	0,00	43.933,34	43.933,34	0,00
		AW4	17.805,37	86.688,20	84.312,93	17.805,37
		AW5	24.931,18	93.814,01	91.438,74	24.931,18
Freio com 3 BCU's Isoladas (N)	F_F	AW0	0,00	0,00	30.280,12	0,00
		AW4	41.558,07	0,00	46.907,01	41.558,07
		AW5	48.683,88	0,00	50.469,91	48.683,88

- A tabela 12 mostra a força de desaceleração EP por carro para freio normal e 3 BCU's isoladas calculadas a partir da eq.(4):

$$F_D_EP = F_F * \mu_DF * n_s * (2 * r_F / D_R) * (i_G / \eta_G) \quad (4)$$

Tabela 12 – Força de desaceleração EP por carro

	Símbolo	Carga	M1	R1	R2	M2
Freio Normal (N)	F_D_EP	AW0	0	81.471	39.865	0
		AW4	32.314	160.756	76.505	32.314
		AW5	45.246	173.971	82.971	45.246
Freio com 3 BCU's Isoladas (N)	F_D_EP	AW0	10.760	0	54.952	10.760
		AW4	75.420	0	85.126	75.420
		AW5	88.352	0	91.592	88.352

- A tabela 13 mostra a massa freiada por disco para freio normal e 3 BCU's isoladas, calculadas a partir da eq.5, incluindo momento de inércia das partes rotativas:

$$M_F = F_{D_EP} * W * \eta_G / [\sum (F_{Dt} * n_s) * 2] \quad (5)$$

Tabela 13 – Massa freiada por disco

	Símbolo	Carga	M1	R1	R2	M2
Freio Normal (kg)	M_F	AW0	0	11.722	11.722	0
		AW4	2.991	14.563	14.164	2.991
		AW5	3.925	14770	14.396	3.925
Freio com 3 BCU's Isoladas (kg)	M_F	AW0	3.299	0	33.693	3.299
		AW4	11.094	0	25.043	11.094
		AW5	12.190	0	25.274	12.190

- A tabela 14 mostra a força de desaceleração disponível no trem combinando os sistemas de freio ED e EP para os casos de freio normal e 3 BCU's isoladas.

Tabela 14 – Força de desaceleração combinando os sistemas (ED e EP)

	Símbolo	Carga	Σ	ED	EP-M1	EP-R1	EP-R2	EP-M2
Freio Normal (N)		AW0	433.860	274.400	0	79.730	79.730	0
	F_Dt	AW4	649.357	274.400	32.314	157.320	153.010	32.314
		AW5	701.084	274.400	45.246	170.252	165.942	45.246
Freio com 3 BCU's Isoladas (N)		AW0	350.874	274.400	10.760	0	54.952	10.760
	F_Dt	AW4	510.365	274.400	75.420	0	85.126	75.420
		AW5	542.694	274.400	88.352	0	91.592	88.352

- A tabela 15 mostra o tempo de resposta, o tempo acumulado e o tempo equivalente de resposta, calculado a partir da eq.(6).

$$T_E = (t_{10} + t_{90}) / 2 \quad (6)$$

Tabela 15 – Tempo de resposta dos sistemas (ED e EP)

	Símbolo	ED	EP-M1	EP-R1	EP-R2	EP-M2
Tempo de Resposta (s)	t(10)	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
Tempo Acumulado entre 10 e 90% (s)	(t90-t10)	0,3	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo Equivalente de Resposta (s)	T_E	0,35	1,2	1,2	1,2	1,2

- A tabela 16 mostra a desaceleração equivalente por carro dos sistemas ED e EP para freio normal e 3 BCU's isoladas, calculadas a partir da eq.(7).

$$D_E = F_{Dt} / W \quad (7)$$

Tabela 16 – Desaceleração equivalente dos sistemas (ED e EP)

	Símbolo	Carga	ED	EP-M1	EP-R1	EP-R2	EP-M2
Freio Normal (m/s ²)	D_E	AW0	0,73	0,00	0,21	0,21	0,00
		AW4	0,49	0,06	0,28	0,28	0,06
		AW5	0,46	0,08	0,28	0,28	0,08
Freio com 3 BCU's Isoladas (m/s ²)	D_E	AW0	0,73	0,03	0,00	0,15	0,03
		AW4	0,49	0,14	0,00	0,15	0,14
		AW5	0,46	0,15	0,00	0,16	0,15

- Utilizando as eq.(8),(9) e (10), foram calculados a desaceleração equivalente, o tempo equivalente e a desaceleração média do trem com freio normal, a tabela 17 mostra os resultados obtidos:

Desaceleração Equivalente do Trem (m/s^2)

$$D_{Et} = \sum(D_E) - g * \sin(\alpha) / [1 + M_r / M] \quad (8)$$

Tempo Equivalente Total (s)

$$T_{Et} = \sum(D_E * (t_{10} + t_{90}) / 2) / D_{Et} \quad (9)$$

Desaceleração Média do Trem (m/s^2)

$$D_M = v * D_{Et} / (v + 2 * D_{Et} * T_{Et}) \quad (10)$$

Tabela 17 – Combinação dos sistemas ED e EP em diversas velocidades para freio normal

Freio Normal	Símbolo	Carga	Velocidade (km/h)				
			20	40	60	80	90
Desaceleração Equivalente do Trem (m/s^2)	D_Et	AW0	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
		AW4	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
		AW5	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
Tempo Equivalente Total (s)	T_Et	AW0	0,697	0,697	0,697	0,697	0,697
		AW4	0,693	0,693	0,693	0,693	0,693
		AW5	0,730	0,730	0,730	0,730	0,730
Desaceleração Média do Trem (m/s^2)	D_M	AW0	1,07	1,11	1,13	1,13	1,14
		AW4	1,08	1,12	1,14	1,15	1,15
		AW5	1,09	1,13	1,15	1,16	1,16

- Utilizando as eq.(8),(9) e (10), foram calculados a desaceleração equivalente, o tempo equivalente e a desaceleração média do trem com freio 3 BCU's isoladas, a tabela 18 mostra os resultados obtidos:

Tabela 18 – Combinação dos sistemas ED e EP em diversas velocidades para freio 3 BCU's isoladas

Freio 3 BCU's Isoladas	Símbolo	Carga	Velocidade (km/h)				
			20	40	60	80	90
Desaceleração Equivalente do Trem (m/s ²)	D_Et	AW0	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
		AW4	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
		AW5	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Tempo Equivalente Total	T_Et	AW0	0,518	0,518	0,518	0,518	0,518
		AW4	0,555	0,555	0,555	0,555	0,555
		AW5	0,593	0,593	0,593	0,593	0,593
Desaceleração Média do Trem (m/s ²)	D_M	AW0	0,89	0,91	0,92	0,92	0,93
		AW4	0,87	0,90	0,90	0,91	0,91
		AW5	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91

- A tabela 15 mostra o espaço percorrido até a parada com freio normal e com 3 BCU's isoladas calculado a partir da eq.(11).

$$S=v^2/(2*D_M) \quad (11)$$

Tabela 19 – Espaço percorrido até a parada

Espaço Percorrido até a Parada (m)	Símbolo	Carga	Velocidade (km/h)				
			20	40	60	80	90
Freio Normal	S	AW0	14	56	123	218	275
		AW4	14	55	122	215	272
		AW5	14	54	121	213	269
Freio 3 BCU's Isoladas	S	AW0	17	68	151	267	338
		AW4	18	69	154	272	344
		AW5	18	69	154	273	345

5. CONCLUSÃO

- Os trens da Série 7000 podem prestar serviço sem prejuízo a segurança operacional com até duas BCU's isoladas, ou seja, com degradação de 25% do freio de serviço. Nesta condição a unidade eletrônica de controle do sistema de freio aumenta as pressões no cilindro de freio dos carros em funcionamento, garantindo a manutenção da taxa de frenagem pelo freio de serviço, compensando também o carregamento de até 10 passageiros/m².
- Quando há a avaria de três BCU's, há um aumento nas distâncias até a parada do trem, como pode ser observado nos resultados obtidos, isto ocorre porque o sistema de frenagem dos trens série 7000, não tem capacidade de compensar o terceiro carro avariado. Quanto maior a velocidade, maior será a distância até a parada da composição.
- Nos resultados observamos que a distância de parada da composição aumenta 12m quando o trem aplica o freio de serviço máximo com a velocidade de 40 km/h em tara.
- Neste caso, temos a possibilidade de ganho operacional, pois a variação de 12m na distância de parada, distância esta que não representa um aumento significativo no risco operacional.
- Já o aumento na velocidade operacional de 20 km/h para 40 km/h em caso de composições com três unidades de eletrônica de controle de freio avariadas possibilita recolher uma composição avariada em metade do tempo atualmente praticado, situação que no horário de pico diminui significativamente o número de passageiros prejudicados pela avaria, que é um dos principais indicadores que a CPTM monitora e que implica diretamente na percepção da satisfação do usuário.
- É importante ressaltar que mesmo com as BCU's isoladas, não há prejuízo ao desempenho do freio de emergência, pois este atua de maneira independente.
- Todos os cálculos e testes foram realizados isolando as BCU's de carros reboques, pois estes carros possuem somente o freio eletropneumático, sendo estas as condições mais restritivas. Portanto podemos assumir que qualquer avaria de BCU em qualquer carro motor implicaria em uma perda de desempenho de frenagem inferior ao de um carro reboque.

- Os cálculos realizados tiveram como objetivo, estimar a distância de frenagem do trem, como este foi o único objetivo, as forças eventualmente geradas entre os engates dos carros não foram estudadas.
- Além das variáveis utilizadas nos cálculos apresentados neste trabalho existem outras que podem influenciar na distância de frenagem, como inclinação da via e trilho molhado que não foram consideradas nos cálculos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma de serviço – Execução de Obras e Serviços ao Longo da Via Férrea – CPTM. Disponível em:
http://webcptm/administracao/sistema_normativo/download.asp?id=2838&id_vr=7 (acesso em 14 março de 2016)
- [2] Manual do Fabricante – Trens série 7000, 7500 e 8000 - CAF
- [3] *(BS EN 13452-1:2003 Railway applications. Braking. Mass transit brake systems. Performance requirements)*
- [4] *(BS EN 13452-2:2003 Railway applications. Braking. Mass transit brake systems. Methods of test)*
- [5] MELERO, M.; *Knorr-Bremse - Preliminary Brake Calculation – Electro pneumatic brake equipment, CPTM São Paulo, 3 ed. Berlim, Germany. Junho 2009. 26 p.*
- [6] Instrução de serviço - Regras básicas para isolamento de truque de trem metropolitano – Linhas 11-Coral / 12-Safira. – CPTM. Disponível em:
<http://webcptm/operacao/proc_oper/default.asp> (acesso em 14 março de 2016)
- [7] Procedimento Operacional de entrega e recebimento de trem entre operação e Manutenção Linhas 11-Coral /12-Safira. – CPTM Disponível em:

<http://webcptm/operacao/proc_oper/default.asp> (acesso em 14 março de 2016)

- [8] Norma regulamentadora nº 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Disponível em: <<http://portal.mte.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR10.pdf>> (acesso em 12 mar. 2016).
- [9] Manual de Manutenção Equipamento Elétrico EMU.01.17 – Armários elétricos.pdf – Trem Série 7000, CAF, 2010