

3º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

AUMENTO DA VELOCIDADE EM BX NA LINHA 3 - VERMELHA DO METRÔ

## INTRODUÇÃO

A sinalização de via da Linha 3 - Vermelha do Metrô de São Paulo foi projetada para a condição de aderência normal na via, com os trilhos secos, baseada nas taxas de frenagem garantidas para os trens nessa situação. Quando chove há redução na taxa de frenagem disponível, o que obriga, para continuar garantindo a operação segura do sistema, a redução da velocidade de operação dos trens. Na situação de baixa aderência (BX) a redução da velocidade de operação dos trens aumenta o tempo de viagem e diminui a capacidade de transporte do sistema.

Para a Linha 3 - Vermelha, foi determinada uma redução de velocidade de 71 % para garantir a operação segura na situação de baixa aderência. Como o trecho descoberto representa aproximadamente 75% da extensão da Linha 3 - Vermelha, essa redução de velocidade tinha efeito notável sobre a capacidade de transporte nessa Linha.

No trabalho apresentado aqui, foi feita uma nova abordagem para determinação da restrição de velocidade dos trens da Linha 3 - Vermelha em condição de baixa aderência, possibilitando o aumento da velocidade dos trens nessa condição de operação. Os trens passaram a operar em BX com cerca de 90% da velocidade obtida em condição de aderência

normal, reduzindo o tempo de viagem e aumentando a capacidade de transporte da Linha 3 - Vermelha em dias de chuva.

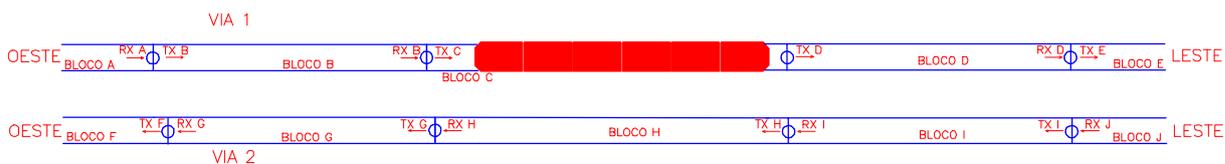
## **DIAGNÓSTICO**

A Linha 3 - Vermelha é composta de 18 estações, duas vias (via 1 e via 2), possui no seu trecho comercial pouco mais de 22 km de extensão, interligando Barra Funda a Itaquera. A sinalização dessa Linha é do tipo bloco fixo, sendo composta por blocos com comprimento médio de 167 m, pouco maiores que os 132 m de comprimento dos trens que operam nela. As rampas dessa Linha tem inclinação máxima de aclave ou declive de 4%, isto é, no caso de rampa com inclinação máxima, para 100 m percorridos haverá aumento ou redução de 4 m de elevação.

## **SINALIZAÇÃO DA LINHA 3 - VERMELHA**

O equipamento de sinalização de via transmite em cada um dos seus blocos um sinal que é captado e decodificado pelos trens. Esse sinal determina ao trem qual a máxima velocidade permitida naquele bloco. Há oito diferentes códigos que podem ser transmitidos aos trens, aos quais correspondem as velocidades limites de 0, 10, 30, 44, 62, 75, 87 ou 100 km/h. Se o trem não receber um código correspondente a uma dessas velocidades ele assumirá que a velocidade permitida é de 0 km/h.

O equipamento de via utiliza esse mesmo sinal para se certificar que no bloco de via não há um trem presente. A via opera com apenas um sentido de movimentação permitido para cada bloco, sentido leste-oeste ou oeste-leste.



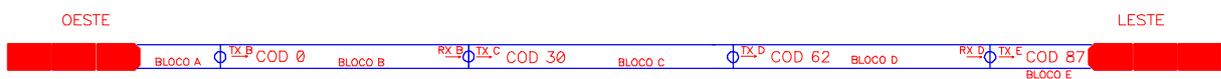
**Figura 1 – Sinalização por blocos na Linha 3 - Vermelha**

### PERFIL DA OCUPAÇÃO

A figura anterior mostra a sinalização por blocos da Linha 3 - Vermelha. No bloco B da VIA1, como o sentido de movimento estabelecido é de leste-oeste, TX B transmite o código de via que é recebido por RX B. A recepção do sinal de TX B em RX B faz com que o equipamento de sinalização de via constate que não há trem presente no Bloco B. No bloco C o sinal é transmitido por TX C e captado pelo trem que se encontra nesse bloco, sendo esse sinal decodificado no trem como sendo a máxima velocidade permitida para sua movimentação. Devido a presença do trem no bloco C o sinal transmitido por TX C não é recebido pelo receptor do bloco C, ocasionando no equipamento de sinalização de via a detecção de que há um trem no bloco C.

Em função do sentido de movimento estabelecido para a via, quando um trem é detectado em um bloco, é transmitido o código de velocidade correspondente a 0 km/h no bloco imediatamente anterior ao qual o trem se encontra. Nos blocos subsequentes o código de

velocidade transmitido é gradualmente aumentado de um bloco para o outro. Isso é mostrado na figura 2, onde é detectado um trem no bloco A, ocasionando a transmissão de código 0 no bloco B, código 30 no bloco C e código 62 no bloco D. No bloco E é transmitido o código normal da via, no caso 87 km/h. Isso faz com que o trem que está no bloco E ao se deslocar para os blocos seguintes, vá recebendo um limite de velocidade decrescente a cada novo bloco que entrar, reduzindo gradativamente a sua velocidade, até parar no bloco B.

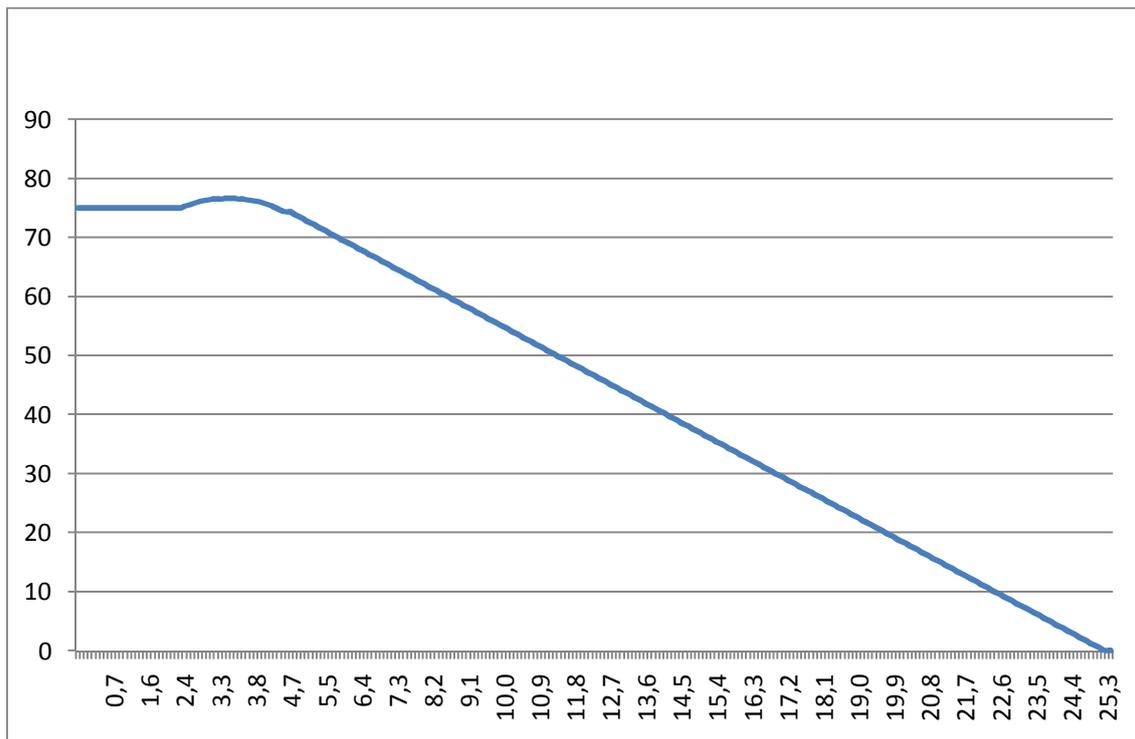


**Figura 2 – perfil de código de velocidade para ocupação no bloco A**

## **MODELO DE FRENAGEM DO PROJETO DA LINHA 3 - VERMELHA - SAFEPRO**

Os códigos de velocidade transmitidos atrás de um bloco ocupado são definidos no projeto de sinalização da via. Para esse projeto foi utilizado um modelo de frenagem do trem, denominado modelo SAFEPRO. Nesse modelo foram consideradas condições críticas operacionais, que resultam em maiores distâncias de frenagem. Nele é assumido que no bloco anterior ao início do processo de frenagem o trem está com velocidade igual à máxima permitida. Quando o trem entra no bloco com velocidade permitida maior, ele continua recebendo o código do bloco anterior por mais 7 m. Após percorrer essa distância no novo bloco, ocorre um atraso para que o código do circuito anterior seja descartado, quando então o trem passa a obedecer ao código de velocidade do novo bloco. Nesse ponto o modelo assume que a aceleração do trem passa a ser a máxima possível para a velocidade

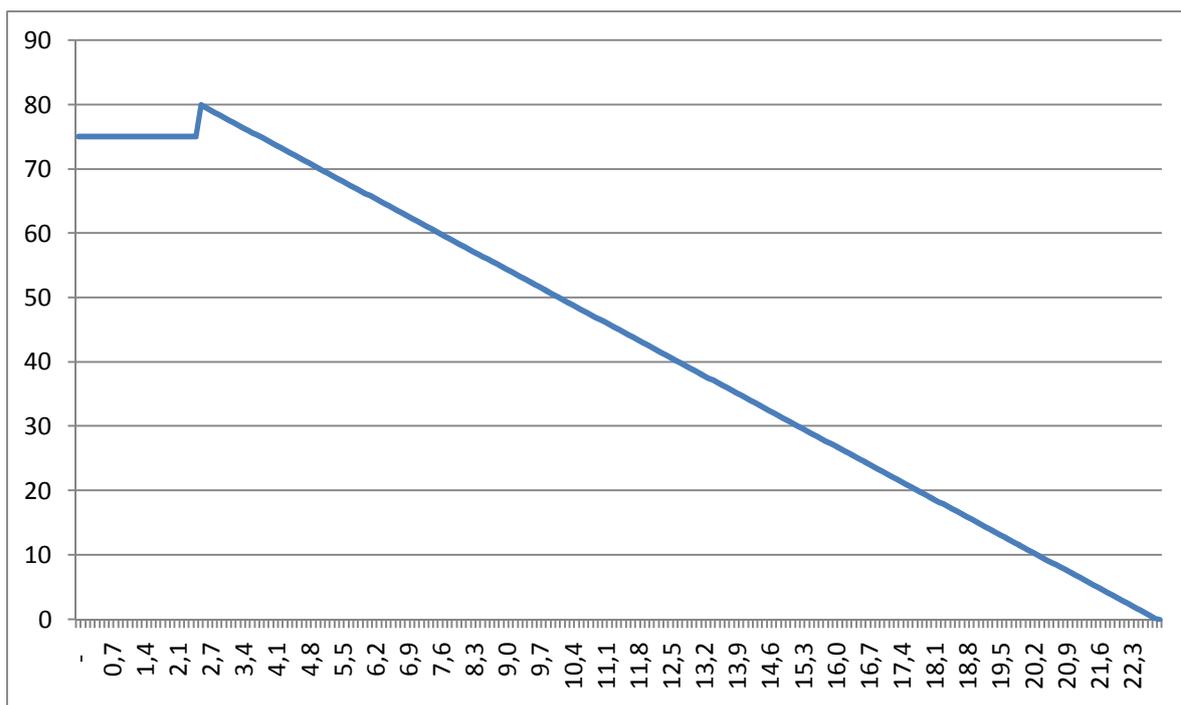
na qual o trem está. Em seguida é iniciado o processo de retirada de propulsão e de aplicação de freio, com taxas e atrasos definidos para essa fase do movimento. A taxa de freio aumenta gradativamente até atingir o valor máximo do modelo SAFEPRO, que é de  $1,0 \text{ m/s}^2$ , quando então permanece constante até a parada do trem do modelo. A partir do ponto onde a velocidade do trem começa a variar, é calculado o efeito da aceleração da gravidade sobre o movimento do trem do modelo, sendo esse efeito somado aos esforços de tração ou frenagem do modelo. O ponto de parada previsto pelo modelo SAFEPRO deve estar no mínimo a 20 m antes do início do bloco ocupado, ou no mínimo a 10 m do ponto do bloqueio fechado. A figura 3 mostra o comportamento da velocidade em função do tempo para o modelo SAFEPRO em um trecho sem variação de rampa.



**Figura 3 – Perfil de velocidade do modelo SAFEPRO (75 km/h para 0, rampa nula)**

## PROCESSO DE CONTROLE DO TREM

O sistema de controle desenvolvido para os trens utilizados na Linha 3 - Vermelha buscou aperfeiçoar o processo de frenagem, aproximando, nas reduções de código de via, a distância percorrida pelos trens das distâncias previstas pelo modelo SAFEPRO, sempre garantindo que as distâncias de frenagem dos trens sejam menores que as distâncias do modelo SAFEPRO. Nos trens foi introduzido um sistema de controle das frenagens denominado BPM (Brake Profile Monitor), o qual entra em ação quando ocorre redução do código de velocidade da via, passando então a monitorar a taxa de frenagem, velocidade e distância percorrida pelo trem. Esse processo, também gera a referência para o controle de velocidade do trem na redução do código de via. No início do processo BPM é calculado o erro de velocidade do trem, obtido pela diferença entre o código de via que o trem estava recebendo anteriormente e a velocidade do trem. A esse erro de velocidade é somado um valor, 5 km/h em condição de aderência normal e 3,5 km/h em condição de baixa aderência. A partir de então o esforço frenante do trem, medido por acelerômetros, é comparado com a taxa de referência do processo BPM, resultando em um erro de aceleração. O erro de aceleração é integrado, resultando na variação do erro de velocidade, o qual é adicionado ao erro de velocidade calculado anteriormente. A variação do erro de velocidade também é integrada, resultando na variação do erro de distância, o qual é somado ao erro de distância anterior. A curva de referência de velocidade do processo BPM é mostrada na figura 4.



**Figura 4 – Perfil de velocidade do processo BPM (75 km/h para 0, rampa nula)**

Os parâmetros do processo BPM foram definidos para que, em qualquer condição de via, a distância de frenagem desse modelo seja sempre inferior a distância do modelo SAFEPRO.

Os parâmetros do processo BPM são velocidade comandada, atraso para detecção de novo código de via, acréscimo de velocidade no início do processo e taxa do processo BPM.

Foram desenvolvidos critérios de frenagem para o trem da Linha 3 - Vermelha que garantem que o trem irá parar sempre com uma distância percorrida menor que a distância obtida para o modelo BPM. Esses trens possuem taxa garantida de freio máximo de serviço de  $1,2 \text{ m/s}^2$  e taxa garantida de freio de emergência de  $1,5 \text{ m/s}^2$ . Como é considerado que no percurso entre duas estações pode ocorrer a falha de freio em um dos seis carros do trem, as taxas consideradas para a definição dos critérios de frenagem dos trens são de  $1,0 \text{ m/s}^2$  para o freio de serviço e de  $1,25 \text{ m/s}^2$  para o freio de emergência.

Portanto, no projeto da Linha 3 - Vermelha foi garantido que, nas situações em que o trem deve parar, a distância de frenagem do trem é sempre inferior ao do modelo do processo BPM e também que a distância de frenagem do modelo BPM é sempre inferior a do modelo SAFEPRO, utilizado para projetar a sinalização da via, portanto o trem irá sempre parar com segurança.

### **FRENAGEM EM CONDIÇÃO DE BAIXA ADERÊNCIA**

Na condição de baixa aderência há uma redução na taxa de frenagem mínima garantida para os trens, pois nessa situação ocorre redução da taxa de aderência roda-trilho. Levantamentos realizados na década de 90 na Linha 3 - Vermelha, com dados reais das frenagens em baixa aderência, indicaram que em BX a taxa de frenagem mínima garantida era de  $0,835 \text{ m/s}^2$ , válida para trem com os seis carros aplicando freio. O modelo de frenagem utilizado nessa condição, também considerou a falha de freio em um dos seis carros do trem, portanto a taxa efetiva de frenagem em baixa aderência utilizada no modelo foi de  $5/6 \cdot 0,835 = 0,695 \text{ m/s}^2$ . Nessa condição, para garantir a parada segura dos trens, é necessário impor uma redução na velocidade de operação do trem em virtude da menor taxa de frenagem garantida.

Durante a frenagem, a variação da velocidade do trem é determinada pela soma da taxa de frenagem disponível com o efeito da aceleração da gravidade, o qual depende da rampa no ponto em que o trem se encontra. Nos trechos em aclave a aceleração da gravidade irá auxiliar a redução de velocidade do trem e nos trechos em declive a aceleração da gravidade irá dificultar a redução de velocidade, reduzindo a taxa efetiva de aceleração com a qual o

trem realizará a frenagem. Considerando os valores máximos de rampa da Linha 3 - Vermelha e a aceleração da gravidade na cidade de São Paulo, o valor da aceleração da gravidade atuando sobre os trens nas rampas com a inclinação máxima de 4% é de  $0,392 \text{ m/s}^2$ , a favor do movimento nos aclives e contra o movimento nos declives.

No caso do modelo SAFEPRO, para a rampa com aclive de 4%, o valor da taxa de variação de velocidade é de  $1,392 \text{ m/s}^2$  ( $1,0 + 0,392$ ). Para a rampa com declive de -4% a taxa de variação de velocidade é de  $0,608 \text{ m/s}^2$  ( $1,0 - 0,392$ ). Na condição de baixa aderência, considerando a ocorrência de uma falha de freio, a taxa garantida de frenagem aplicada pelo trem é de  $0,695 \text{ m/s}^2$ , portanto, a taxa da variação de velocidade para rampa com aclive de 4% é de  $1,087 \text{ m/s}^2$  ( $0,695 + 0,392$ ), enquanto para rampa em declive de -4% a taxa de variação de velocidade na frenagem efetiva é de  $0,303 \text{ m/s}^2$  ( $0,695 - 0,392$ ). Para a rampa em aclive de 4%, a redução da taxa de variação da velocidade em BX, em relação ao modelo SAFEPRO, é de  $1,087/1,392 = 0,781$ , enquanto para declives de 4% a redução é de  $0,303/0,608 = 0,498$ . Assim, para rampa com declive de 4% há maior redução da taxa efetiva variação da velocidade em relação ao modelo SAFEPRO, sendo esse o caso crítico para frenagem em baixa aderência. Portanto, a definição da restrição de velocidade necessária para operação em baixa aderência foi feita para a rampa em declive de 4%, ou seja, quando garantido que a restrição de velocidade em BX é a necessária para rampa em declive de 4%, está garantido que em qualquer outra condição a distância de frenagem em BX será menor que a do SAFEPRO.

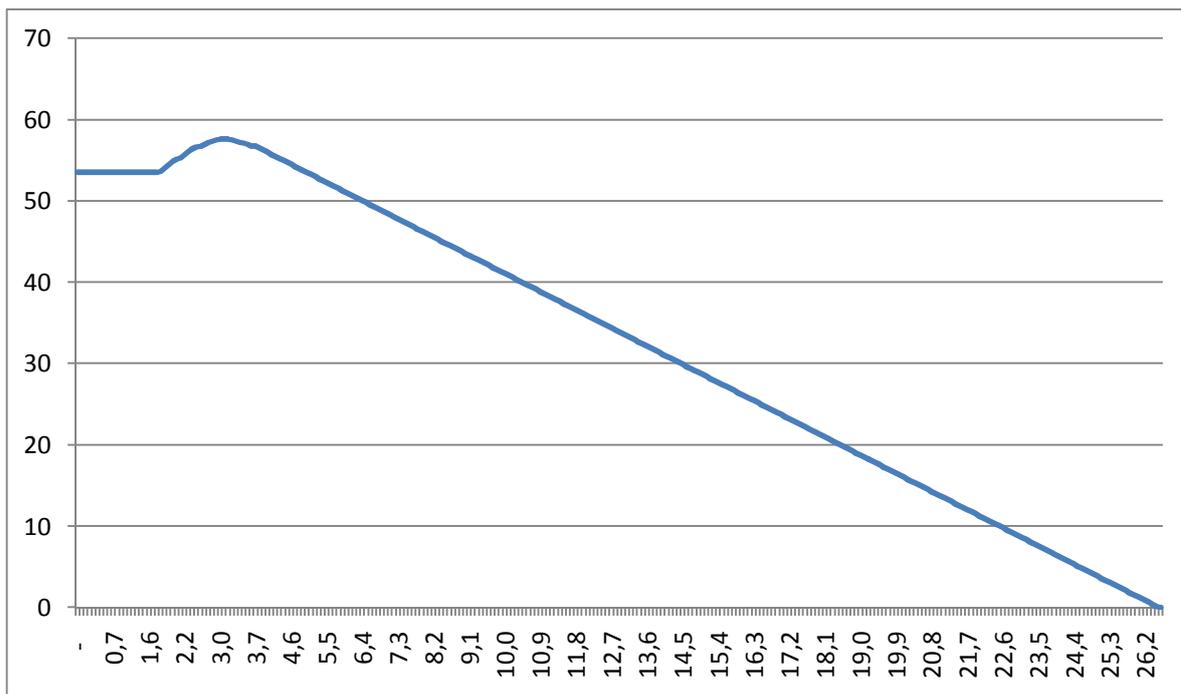
Um modelo de frenagem em baixa aderência (MODELO DE BX) foi desenvolvido para determinar as restrições de velocidade necessárias para operar nessa condição na Linha 3.

Esse modelo calcula as distâncias de pior caso para frenagem em condição de baixa aderência. Esse modelo considera as condições mais desfavoráveis, sendo a frenagem realizada com falha de freio em um dos seis carros do trem.

Antes da queda do código, a velocidade do trem é de 1 km/h inferior a velocidade comandada, pois essa é a máxima velocidade do trem da Linha 3 - Vermelha para a qual não há aplicação de freio de segurança. Por uma distância de 7 m após o início do bloco de via com código menor, é considerado que o código anterior continua sendo recebido. A partir desse ponto onde o código do bloco anterior deixa de ser recebido é contado um tempo, durante o qual o valor de velocidade do código anterior é mantido, sendo esse tempo corresponde ao temporizador para perda de código existente no equipamento de controle instalado no trem (ATC).

Assim que o código menor é detectado, a aceleração do trem passa a ser igual a máxima aceleração possível para a velocidade em que o trem se encontra. Em seguida o modelo começa a retirada de aceleração e aplicação de frenagem. A taxa máxima de frenagem que será utilizada corresponde a 5/6 da taxa nominal, portanto a taxa foi de 0,695 m/s<sup>2</sup>.

Na figura 5 é mostrado o perfil de velocidade de uma transição de código de 75 km/h para 0 em rampa nula. A velocidade inicial modelo é de 53,0 km/h, a qual é 1 km/h abaixo da velocidade com restrição que era utilizada para a condição de baixa aderência (54 km/h).



**Figura 5 – MODELO DE BX (transição de código de 75 km/h para 0, rampa nula)**

As reduções de velocidade que foram utilizadas para os trens de Linha 3 - Vermelha em condição de baixa aderência, obtidas a partir desse modelo estão na Tabela 1.

**Tabela 1**

<b>Código de Via</b>	<b>Velocidade com Restrição em BX</b>	<b>Redução na Velocidade</b>
<b>100</b>	<b>71</b>	<b>0,71</b>
<b>87</b>	<b>61,5</b>	<b>0,707</b>
<b>75</b>	<b>54</b>	<b>0,72</b>
<b>62</b>	<b>46</b>	<b>0,742</b>
<b>44</b>	<b>32,5</b>	<b>0,739</b>
<b>30</b>	<b>21</b>	<b>0,70</b>
<b>10</b>	<b>8</b>	<b>0,80</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-</b>

## **AUMENTO DA VELOCIDADE EM BAIXA ADERÊNCIA NA LINHA 1 - AZUL**

O Metrô realizou um trabalho de modernização do sistema de freio dos trens das suas frotas, que resultou em uma maior eficiência da frenagem em condição de baixa aderência. Essa capacidade maior de frenagem foi comprovada por um estudo contratado pelo Metrô. Nesse estudo foi realizada a coleta de dados das frenagens dos trens com freios modernizados, e comprovou que a taxa mínima garantida de frenagem aumentou para  $1,0 \text{ m/s}^2$  em baixa aderência. Como todos os trens em operação na Linha 1 - Azul tiveram o seu sistema de freio modernizado, a partir da comprovação do aumento da taxa garantida de frenagem em baixa aderência desses trens, foi possível aumentar a velocidade de operação dos trens da Linha 1, passando a restrição de velocidade em baixa aderência de 71% para 86%.

Na Linha 3 - Vermelha há duas novas frotas de trens, que possuem sistemas de freio compatíveis com os modernizados. O estudo que comprovou a melhoria da eficiência dos freios modernizados não foi realizado para essas novas frotas, pois essas não faziam parte da modernização do freio, portanto os resultados desse estudo não foram estendidos para essas frotas. A adoção do mesmo método que possibilitou o aumento de velocidade em baixa aderência na Linha 1 - Azul exigiria a contratação de estudo comprovando que poderia ser utilizada uma taxa de freio maior para essas frotas. A realização desse estudo necessitaria do levantamento dos dados em condição de operação em baixa aderência. Posteriormente seria necessária a análise desses dados, comprovando que essas frotas também possuem uma maior taxa garantida de frenagem, o que permitiria determinar as novas velocidades em baixa aderência. Finalmente seria necessário realizar testes em pontos

12

críticos da via com as novas restrições de velocidade. Seguindo esse caminho, seriam necessários cerca de três anos para que fosse possível implantar as novas velocidades de BX na Linha 3 - Vermelha.

## **NOVO PROCESSO PARA DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES EM BAIXA**

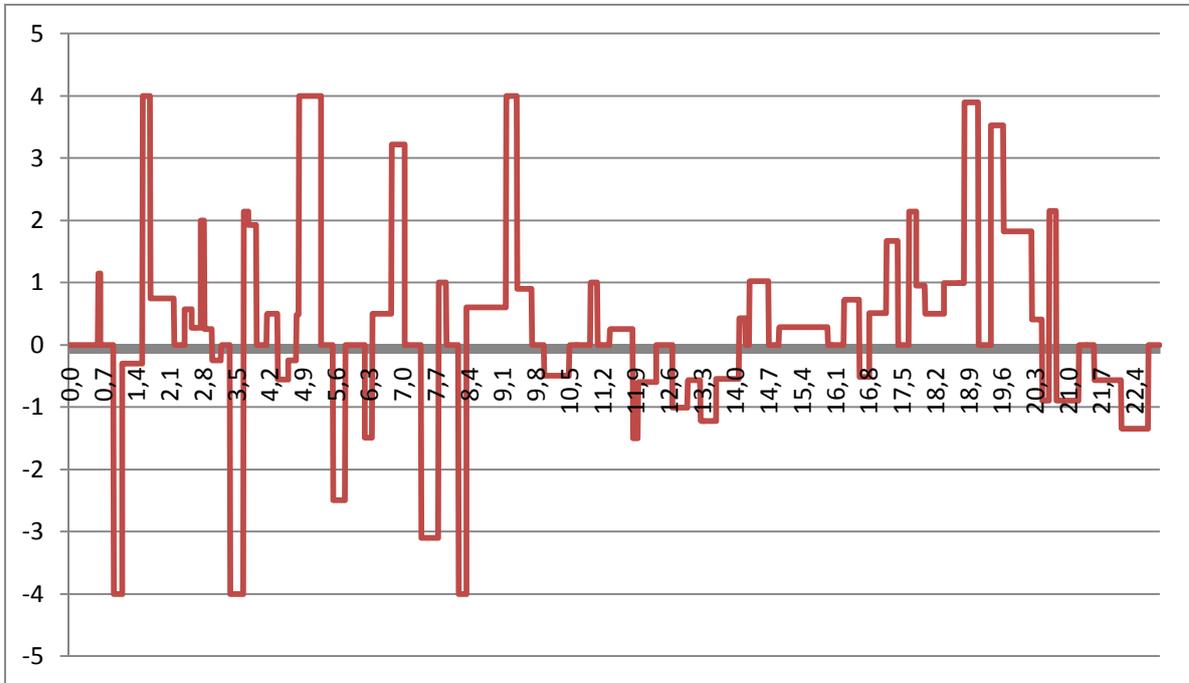
### **ADERÊNCIA**

Um novo método para determinação da restrição de velocidade em baixa aderência foi elaborado pelo Metrô. A nova restrição de velocidade foi obtida mantendo-se a taxa de frenagem garantida em baixa aderência em  $0,835 \text{ m/s}^2$ , a margem de segurança do ponto de parada para uma ocupação em no mínimo 20 m e a margem de segurança para parada em bloqueio fechado em no mínimo 10 m.

O de aumento da velocidade de operação em baixa aderência dos trens da Linha 3 - Vermelha tem por objetivo reduzir o tempo de viagem. Na Linha 3, quando não há perfil de ocupação ou perfil de bloqueio fechado, os códigos de velocidade encontrados pelos trens são 62, 75, 87 e 100 km/h. Os códigos de velocidade 0, 10, 30 e 44 km/h só são encontrados nas regiões de manobra, ou quando é imposta restrição a um trecho de via, ou quando há perfil de ocupação ou de bloqueio fechado. Portanto para que o objetivo de redução de tempo de viagem fosse alcançado, apenas a alteração na restrição dos códigos de velocidade 62, 75, 87 e 100 km/h seria necessária.

As restrições anteriores de velocidade em baixa aderência foram obtidas para a rampa com declive de 4%, que é a condição crítica de rampa na Linha 3 - Vermelha. A figura 6 mostra os

valores das rampas da via 2 da Linha 3 - Vermelha no sentido de Barra Funda para Itaquera, os valores positivos são rampas em alicive e os valores negativos são de rampa em declive. Para a via 1 da Linha 3 os valores são semelhantes.



**Figura 6 – Inclinação da Linha 3 no sentido Barra Funda a Itaquera**

Pela figura 6 verifica-se que na maior parte da Linha 3 - Vermelha os valores de rampa são inferiores a 1%.

A restrição de velocidade em baixa aderência foi obtida para rampa em declive de 4%, que é o pior caso de rampa para essa condição de operação na Linha 3. Como poucos trechos da via possuem rampa em declive superior a 1%, o valor de restrição adotado é exageradamente restritivo na maior parte da via. Portanto, com a adoção de uma restrição de velocidade menor em baixa aderência, as distâncias de frenagem continuariam sendo menores que a de SAFEPRO na maior parte da via.

As situações onde o ponto de parada do trem em baixa aderência está após o ponto de parada do modelo SAFEPRO podem ser divididas em dois casos diferentes. No primeiro, o trem operando em BX com menor restrição de velocidade, para em um ponto antes das margens mínimas especificadas, 20 m para ocupação ou 10 m para bloqueio fechado, portanto nesses casos o trem pode operar com segurança em BX e com as restrições menores de velocidade.

O segundo caso para a nova restrição de velocidade de BX, é aquele no qual o ponto de parada previsto estaria além das margens de segurança especificadas. Nesse caso a sinalização da via deve ser alterada, tornando-se mais restritiva, com isso permitindo a operação segura dos trens em baixa aderência com a menor restrição de velocidade.

Portanto, a redução da restrição de velocidade em baixa aderência, imposta aos trens em todo o trecho descoberto da Linha 3 - Vermelha, foi obtida a custa do aumento da restrição da via. Essa alteração na via foi necessária apenas em trechos com maior declividade.

A restrição introduzida na via afeta somente as situações em que o trem será obrigado a parar, por um perfil de ocupação ou de bloqueio fechado. Nos casos em que a via na frente do trem está livre, não há necessidade de alteração dos códigos de velocidade. Nos perfis de ocupação, a restrição imposta à via foi realizada por redução de códigos nesse perfil de ocupação ou pelo aumento no número de circuitos afetados pela ocupação.

Os novos valores de redução adotados para operação em baixa aderência buscaram, para essa condição operacional, elevar a velocidade de operação dos trens para um valor próximo do obtido para a Linha 1, com a alteração de um número mínimo de perfis de velocidade de

via, pois quanto menor a restrição adotada, maior o número de perfis que deveriam ser alterados.

## **FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA DEFINIÇÃO DAS NOVAS VELOCIDADES DE BAIXA ADERÊNCIA**

O projeto da sinalização de via da Linha 3 - Vermelha foi realizado com o uso de um programa de computador, o qual calcula o movimento de um trem de acordo com o modelo SAFEPRO. Nesse programa são introduzidos os dados da via como inclinação e cotas das rampas, cotas dos blocos de via e dispositivo transmissor de sinal de via utilizado. Nesse programa também é possível alterar alguns parâmetros do trem, como por exemplo, a taxa de frenagem.

Com o novo processo idealizado para determinar as restrições de velocidade em baixa aderência, foi necessário estipular um valor de restrição e verificar qual o número de alterações necessárias na via para permitir a operação segura com o novo valor de restrição estipulado. Essa verificação teve de ser realizada em todos os blocos das duas vias de Linha 3, nos sentidos normal e reverso de cada via. O programa utilizado para calcular o modelo SAFEPRO não foi escrito com esse objetivo, tornando muito lenta a realização desse tipo de trabalho com ele.

Um novo programa, denominado SA\_VT\_BX, foi escrito para realizar a tarefa de definição das novas restrições de velocidade em baixa aderência. Esse programa foi escrito na linguagem Pascal e é executado em máquinas com sistema operacional Windows de 64 bits.

O programa possui um módulo que calcula o modelo SAFEPRO e um módulo que calcula o de frenagem em condição de baixa aderência, MODELO DE BX. As entradas do programa são dois arquivos de texto, os quais contém os dados relativos as rampas de cada via, via 1 e via 2, e quatro arquivos de texto com os dados da sinalização de cada via/sentido, via 1 normal, via 1 reverso, via 2 normal e via 2 reverso. Simulando uma via/sentido, o programa gera duas listagens, sendo que na primeira é listada, para cada bloco de via, a identificação do bloco de via, a cota do fim do bloco de via, o código de via, o cálculo do ponto de parada do modelo SAFEPRO, o ponto de parada do modelo de frenagem em baixa aderência, a diferença entre os dois modelos e a folga do modelo SAFEPRO. Quando o ponto de parada do modelo para baixa aderência está na frente do ponto do modelo SAFEPRO, também é calculada a folga do modelo de frenagem em baixa aderência para o ponto antes de 20 m da cota de início do próximo bloco de via.

Para cada bloco de via da Linha 3, o cálculo é realizado para o código máximo de via presente naquele bloco, que é o código de via quando não há ocupação, e também é realizado para todos os códigos inferiores, até o código 44, isto é, se o código de via do bloco a partir do qual está sendo feito o cálculo for 100, será realizado o cálculo para os códigos 100, 87, 75, 62 e 44. Isso foi feito porque em um bloco de via, no qual normalmente é transmitido o do código 100, pode ocorrer a transmissão de um desses códigos menores em caso de ocupação de um bloco próximo a frente. É gerada uma linha na listagem para cada código de velocidade.

As linhas da listagem, para as quais o ponto de parada do modelo de frenagem em baixa aderência está na frente do ponto de parada do modelo SAFEPRO, é calculada a folga do

modelo de frenagem em baixa aderência para o ponto 20 m antes do próximo bloco de via. Onde essa folga é negativa, indica que é necessária a alteração na via. A contagem desses casos fornece o número de alterações necessárias na via para permitir a operação segura com a restrição de velocidade escolhida.

Em alguns casos o programa realiza cálculos para códigos que não existem no bloco de via. Os casos que indicam necessidade de alteração para códigos que nunca são transmitidos no bloco de via em análise foram descartados manualmente.

A segunda listagem gerada pelo programa lista, ao final de cada intervalo de cálculo, os resultados obtidos para cada modelo. Essa segunda listagem permite verificar como foi realizado o cálculo do ponto de parada de cada situação simulada. Na validação desse programa foi utilizada essa listagem para verificar que os cálculos realizados estavam corretos.

O programa SA\_VT\_BX foi utilizado para definição das novas restrições de velocidade em BX. Adicionalmente, após a definição das novas restrições de velocidade, para determinar os pontos da via que foram alterados, também foi utilizado o programa SAFEPRO. O valor de taxa utilizado no programa SAFEPRO foi de  $0,69 \text{ m/s}^2$ , pois esse programa só aceita valores de taxa com duas casas decimais. Devido a isso, para maior compatibilidade entre os dois programas de simulação, o valor de taxa utilizado na simulação de baixa aderência no programa para SA\_VT\_BX foi de  $0,828 \text{ m/s}^2$ , que resulta no valor de  $0,69 \text{ m/s}^2$  quando é considerada a falha de freio de um dos seis carros do trem.

## **NOVAS RESTRIÇÕES DE VELOCIDADE PARA A LINHA 3 - VERMELHA**

A precisão adotada para o valor de velocidade com a restrição de baixa aderência foi de 0,5 km/h, pois esse é o valor de escala de velocidade que pode ser programado em qualquer dos modelos de equipamento ATC que equipam os trens da Linha 3 - Vermelha.

Após terem sido experimentados diversos valores de velocidade para a condição de baixa aderência no novo programa SA\_VT\_BX, os valores para restrição de velocidade escolhidos são os mostrados na tabela 2.

**Tabela 2**

<b>Código de Via</b>	<b>Nova Velocidade com Restrição em BX</b>	<b>Redução na Velocidade</b>
<b>100</b>	<b>85,5</b>	<b>0,855</b>
<b>87</b>	<b>74,0</b>	<b>0,851</b>
<b>75</b>	<b>64,5</b>	<b>0,871</b>
<b>62</b>	<b>54,5</b>	<b>0,879</b>
<b>44</b>	<b>32,5</b>	<b>0,739</b>
<b>30</b>	<b>21</b>	<b>0,70</b>
<b>10</b>	<b>8</b>	<b>0,80</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-</b>

Com esses novos valores de velocidade para operação em baixa aderência, o número necessário de alterações na sinalização de via indicados pelo programa SA\_VT\_BX, para garantir a operação segura dos trens na Linha 3 - Vermelha, foi de 45 alterações. No final do processo, com as simulações adicionais realizadas com o programa original de cálculo do

SAFEPRO, utilizando os parâmetros de entrada modificados para as condições de baixa aderência, mais 4 pontos da via foram alterados, tendo sido realizadas no total 49 alterações na via. Foi realizada a alteração de todos os casos nos quais uma das simulações indicou a necessidade de modificação na via.

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS**

1. A referência para controle de velocidade dos trens é de 3 km/h abaixo dos valores mostrados na tabela 2 para a condição de baixa aderência e de 4 km/h abaixo dos valores da tabela 2 para a condição de aderência normal. O valor de referência no controle de velocidade é limitado a 83 km/h, com isso nos trechos de via com código 100 a referência para controle de velocidade na condição de aderência normal é de 83 km/h e na condição de baixa aderência é de 82,5 km/h, portanto nos blocos com código de via de 100 km/h a velocidade dos trens será praticamente igual para qualquer condição de operação. No trecho descoberto da Linha 3 - Vermelha, no sentido normal de operação das vias 1 e 2, o código 100 é transmitido em 41 % dos blocos, portanto no trecho descoberto da Linha 3 - Vermelha, em 41 % dos blocos praticamente não há diferença entre a velocidade dos trens operando em BX para a velocidade dos trens operando em condição normal de aderência. Em virtude disso a velocidade média dos trens na condição de baixa aderência ficou em torno de 92 %

da velocidade média em condição de aderência normal. Antes desse estudo a redução média de velocidade era de 76 %.

2. A redução do tempo de viagem no trecho descoberto da Linha 3 - Vermelha foi de 2 minutos por sentido, permitindo em baixa aderência a utilização de dois trens adicionais, o que representa um aumento de 5 % na capacidade do sistema.
3. Os pontos da Linha 3 - Vermelha que limitam o intervalo mínimo entre os trens ("headway"), onde normalmente os trens ficam mais próximos, são as estações com maior tempo de parada dos trens, Brás e Praça da Sé na via 1 e Praça da Sé na via 2. Essas estações são acessadas por trechos em active, portanto não ocorreu alteração na via no acesso a essas estações. Em consequência, a adoção dessa solução para a Linha 3 - Vermelha não afeta o "headway" dessa Linha em dias sem restrição.
4. Essa modificação foi realizada em um prazo de 10 meses, inferior aos 3 anos que seriam necessários para se obter os mesmos resultados utilizando a metodologia anterior. Praticamente todo o trabalho foi realizado com mão de obra Metrô, tendo sido necessária apenas a contratação externa da análise de segurança das pequenas modificações realizadas no ATC dos trens.
5. Em todos os locais da via, nos quais as simulações indicaram que a folga do ponto de parada seria inferior a 50 m, foram realizados testes com um trem modificado para reproduzir as condições utilizadas nas simulações. Nesses testes as folgas medidas foram todas maiores que os valores simulados. Os modelos utilizados nas simulações são conservadores, consideram o pior caso para todas as condições, apresentando

por isso sempre em folgas menores, embora não excessivas, que as que se consegue com o trem real.

## **CONCLUSÕES**

Os resultados desse estudo possibilitou o aumento médio de 21% da velocidade dos trens na Linha 3 - Vermelha em condição de baixa aderência, resultando na diminuição do tempo de viagem e no aumento da capacidade de transporte nessa situação. Agora o sistema de controle dos trens da Linha 3 - Vermelha é capaz compensar a redução de velocidade imposta aos trens em dias de chuva, portanto a Linha 3 - Vermelha passou a operar com a mesma eficiência tanto nos dias secos como nos com chuva.

A definição de uma nova metodologia para determinação das restrições de velocidade em baixa aderência, apresentada aqui, foi a parte inicial do trabalho realizado no Metrô para que fosse possível obter o de aumento da velocidade dos trens em baixa aderência na Linha 3 - Vermelha. Foi necessário o envolvimento de várias áreas da empresa para a execução do trabalho que possibilitou o aumento efetivo da velocidade dos trens.

GMT/MTT/EPR - Realizando a validação do programa SA\_VT\_BX, modificando os programas do ATC dos trens da Linha 3 - Vermelha, modificando os trens utilizados nos testes e realizando os dos testes na via.

GCS - Realizando as simulações com o SAFEPRO e definindo as alterações da via e os pontos à serem testados.

GMT/MTT/EPN - Realizando as modificações no projeto da sinalização de via e supervisionando a execução dos trabalhos.

GMT/MTT/PPA - Realizando a programação dos testes na via.

GMT/MTS/ENC - Realizando as modificações na sinalização de via e os testes na via.

GMT/MTO/OFJ - Realizando a gravação dos programas modificados dos trens da Linha 3.

GMT/MTR/MRL - Implantando as modificações nos trens e realizando o teste dos trens modificados.

GOP - Realizando a operação dos trens durante os testes.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

RTE 01-018002300 -CMW

Free Pascal - Programação de Computadores

José Augusto M. G. Manzano / Wilson Y. Yamatumi

Editora Erica

[www.lazarus-ide.org](http://www.lazarus-ide.org)