

**ABORDAGEM CINEMÁTICA SOBRE O CONFORTO EM VIAGENS DE
TRENS DO METRÔ DE SÃO PAULO A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS
COM UM DRONE¹**

Samuel Kioshi TUZI²
FATEC TATUAPÉ
Aluno

Carlos Eduardo de ALMEIDA³
FATEC TATUAPÉ
Aluno

Gabriel Rodrigues de LIMA⁴
FATEC TATUAPÉ
Aluno

Rogério Rodrigues de SOUZA⁵
FATEC ITAQUERA/MAUÁ/TATUAPÉ
Professor/Fatec

RESUMO

A aceleração e suas variações súbitas podem gerar desconforto nos meios de transportes públicos. Neste artigo, procurou-se verificar as condições de velocidade e aceleração em percursos de trens do metrô de São Paulo e comparar com os valores da literatura associados à condição de conforto. Foi utilizado um drone para filmagens aéreas da movimentação de trens do metrô de São Paulo e a partir da análise das imagens obtidas, foram calculadas aceleração média, velocidade máxima e taxa de aceleração. Para a velocidade média das composições os dados foram coletados no interior da própria composição. O resultado da aceleração média foi compatível com o valor da literatura e os valores das taxas de acelerações apresentaram superiores aos considerados para situações de conforto para uma viagem em pé nessas composições analisadas. Este resultado implica que soluções devem ser implementadas para uma viagem mais confortável e segura.

Palavras-chave: Aceleração longitudinal; Taxa de aceleração; Velocidade máxima.

**CINEMATIC APPROACH TO COMFORT IN TRAVEL OF SUBWAY TRAINS
FROM SAO PAULO IMAGES OBTAINED WITH A DRONE**

ABSTRACT

¹ Trabalho curricular da disciplina de Física Aplicada aos Transportes

² samuel.tuzi@fatec.sp.gov.br

³ carlos.almeida16@fatec.sp.gov.br

⁴ gabriel.lima92@fatec.sp.gov.br

⁵ rogerio.souza10@fatec.sp.gov.br

Acceleration and its sudden variations can generate discomfort in public transport. In this article, we tried to verify the conditions of speed and acceleration in train routes of the São Paulo subway and to compare with the values of the literature associated with the condition of comfort. A drone was used for aerial filming of the movement of trains of the São Paulo subway and from the analysis of the images obtained, average acceleration, maximum speed and acceleration rate were calculated. For the average speed of the compositions, the data were collected inside the composition itself. The result of the mean acceleration was compatible with the value of the literature and the values of acceleration rates were higher than those considered for comfort situations for a walking trip in these analyzed compositions. This result implies that solutions must be implemented for a more comfortable and safe trip.

KEYWORDS: Longitudinal Acceleration; Acceleration rate; Maximum speed.

Introdução

A diminuição do tempo de viagem nos transportes públicos terrestres é uma percepção positiva para as pessoas que utilizam essa modalidade de transporte na cidade de São Paulo (IBOPE, 2017). Para diminuir o tempo de viagem, meios de transporte modernos podem propiciar uma aceleração maior. No entanto, efeitos fisiológicos e cinesiológicos indesejáveis, e bem como o desconforto nas viagens podem ser causados por acelerações. Estimativas de desconforto tem sido obtidas com a utilização do *Sistema de Posicionamento Global (GPS)* (ZOCALI et al., 2018), e com celulares (RODRÍGUEZ et al., 2021) para acelerações positivas e negativas.

A possibilidade de um passageiro viajando em pé em equilíbrio neste tipo de transporte público, está relacionada com a aceleração longitudinal. Por outro lado, a adoção de medidas para melhorar a sensação de conforto dos passageiros nas viagens se baseiam no conhecimento dos valores destas acelerações. Atualmente os vagões do metrô de São Paulo possuem alças para os passageiros, que auxiliam nas viagens em pé nas composições.

Procurou-se calcular velocidade máxima, aceleração longitudinal média e as variações súbitas desta que passageiros podem estar submetidos durante um trajeto num trem do metrô de São Paulo. Os valores de acelerações e velocidades foram obtidos a partir de análise de imagens capturadas por um drone.

Fundamentação teórica

Efeitos fisiológicos das acelerações podem ser classificados de acordo com as direções do eixo cabeça-pés de um passageiro e da aceleração a que ele é submetido.

Nesta classificação as acelerações são conhecidas como: positiva, negativa e longitudinal. A Figura 1 exemplifica estas acelerações.



Figura 1 – Ilustração das acelerações associadas a efeitos fisiológicos. A orientação da aceleração em relação ao eixo cabeça-pés é utilizada para classificar as acelerações e seus possíveis efeitos fisiológicos.

FONTE: Autores

Os efeitos fisiológicos que as acelerações podem provocar dependem dos valores das acelerações. Estas acelerações são medidas em unidades de g (aceleração da gravidade) de $9,8 \text{ m/s}^2$. A Tabela 1 resume esses efeitos.

Classificação	Aceleração (g)	Efeitos Fisiológicos
Positiva	de 1g a 2g	Sensações de pés e mãos pesados, dificuldade de movimentação das extremidades, câimbras, confusão e desorientação mental
	de 2g a 3g	Inconsciência
Negativa	de 1g a 3g	Dificuldade na respiração, rompimento de artérias, falta de visão, perda temporária de visão e confusão mental
	de 3g a 5g	Parada cardíaca
Longitudinal	até 12g	Ausência de efeitos graves, mas com aumento da pressão sanguínea

Tabela 1 – Efeitos fisiológicos associados as acelerações positivas, negativas e longitudinais aplicadas num longo intervalo de tempo

FONTE: adaptado (GREGERSEN, 2015).

Em transportes públicos terrestres na cidade de São Paulo, as acelerações que os passageiros são submetidos são muito menores que as mencionadas anteriormente. No entanto, há uma preocupação com o conforto nas viagens e que está relacionado com as

variações da aceleração. O desconforto nas viagens está relacionado com as variações súbitas da aceleração e que podem causar desequilíbrio dos passageiros (GEORGE et al., 2013). Um valor máximo para esta quantidade considerada como confortável é de 0,60g/s (MARTIN & LITWHILER, 2008).

A possibilidade de se manter em pé depende do sistema nervoso central de processar sinais vestibulares, visuais e sensoriomotores (BORTOLOTTO et al., 2018). Quando os sinais sensoriomotores captam um desequilíbrio de pressão entre um pé e o outro, há estímulo dos músculos das pernas para se opor ao aumento de pressão (POWELL & PALACÍN, 2015). Na condição de equilíbrio, a força resultante deve estar na região delimitada pelos pés do passageiro. Existem 3 estratégias inconscientes para o corpo manter a força resultante nesta região. A Tabela 2 resume estas estratégias.

Aceleração (g)	Efeitos Fisiológicos
$0 < a < 0,11g$	requer inclinação dos tornozelos e contração dos músculos das pernas
$0,11g < a < 0,15g$	requer inclinação dos quadris
$a > 0,15g$	requer um deslocamento com um ou mais passos

Tabela 2 – Estratégias para um passageiro se manter em equilíbrio na posição ereta em função da aceleração longitudinal imposta numa viagem num transporte público terrestre
 FONTE: adaptado (HOBBEROK, 1976)

A seguir aborda-se como foram obtidas velocidades e acelerações das composições com a utilização das imagens feitas com um drone.

Desenvolvimento

Foram realizadas filmagens de tráfegos de trens, no trecho entre as estações Vila Matilde e Guilhermina Esperança do metrô de São Paulo, com uma câmera de um modelo de drone da fabricante DJI. A câmera deste drone apresenta uma resolução de 240 quadros por segundo. Também foram utilizados um cronômetro e um editor de imagens da *Adobe Premiere*. Com as imagens coletadas pelo drone, foram contados os quadros sucessivos a partir de um ponto pré-estabelecido como referência. A partir da

resolução de 240 quadros por segundo, atribuiu-se um tempo para os quadros. Desta forma, conta-se a quantidade de quadros que leva para o trem atravessar um ponto de referência (Figuras 2, 3 e 4) e obtém-se o tempo transcorrido.



Figura 2 – Início da contagem dos quadros. A linha vertical, em destaque, foi introduzida na figura como referência para medida da distância percorrida pelo trem.

FONTE: Autores.



Figura 3 – Movimentação do trem no trecho de aceleração. Conhecendo-se o comprimento do trem, que é de 130,5 metros, é possível obter a distância percorrida pelo trem em cada quadro. A partir destas informações um gráfico da distância percorrida versus tempo foi construído.

FONTE: Autores.



Figura 4 – Término da contagem de quadros. A passagem inteira do trem pela linha de referência corresponde a 130,5 m.

FONTE: Autores

Obtenção da aceleração

O comprimento do trem é de 130,5 m. Foram utilizados 25 quadros que corresponderam às imagens da passagem completa do trem pelo ponto de referência. Para o ponto de referência foi utilizada uma linha vertical introduzida na imagem com uma ferramenta de desenho do editor como mostrado nas Figuras 2, 3 e 4. Os dados coletados dos 25 quadros foram organizados na Tabela 3.

S (m)	Quadro	t (s)	t'(s)	tempo médio (s)	Velocidade Instantânea (m/s)
0,00	1301	5,42	0,00		
5,44	1529	6,37	0,95	6,21	6,85
10,88	1682	7,01	1,59	6,95	9,32
16,31	1809	7,54	2,12	7,59	9,32
21,75	1962	8,18	2,76	8,12	9,32
27,19	2089	8,70	3,28	8,68	10,79
32,63	2204	9,18	3,76	9,16	12,03
38,06	2306	9,61	4,19	9,65	11,65
43,50	2428	10,12	4,70	10,08	11,55
48,94	2532	10,55	5,13	10,53	13,18
54,38	2626	10,94	5,52	10,94	14,03
59,81	2718	11,33	5,91	11,35	13,32
65,25	2822	11,76	6,34	11,74	13,18
70,69	2916	12,15	6,73	12,13	14,58
76,13	3001	12,50	7,08	12,50	15,72
81,56	3082	12,84	7,42	12,86	15,26
87,00	3172	13,22	7,80	13,21	14,58
92,44	3261	13,59	8,17	13,56	15,63
97,88	3339	13,91	8,49	13,91	17,06
103,31	3414	14,23	8,81	14,25	16,31
108,75	3499	14,58	9,16	14,57	15,63
114,19	3581	14,92	9,50	14,90	16,84
119,63	3654	15,23	9,81	15,23	17,76
125,06	3728	15,53	10,11	15,53	18,00
130,50	3799	15,83	10,41		

Tabela 3 – Dados obtidos de uma composição num trecho de aceleração. A coluna **S** corresponde a distância percorrida, a coluna **Quadro** corresponde às imagens analisadas, a coluna **t** corresponde aos tempos convertidos em segundo a partir da razão entre a quantidade de quadros e a resolução da câmera (240 quadros/s) e a coluna **t'** são os tempos respectivos quando iniciado em **t = 0 s**, isto é, em todos os dados para o tempo foram subtraídos de 5,42 s.

Com as informações desta Tabela 3 foi construído um gráfico da distância percorrida pelo trem versus o tempo. A Figura 5 mostra este gráfico.

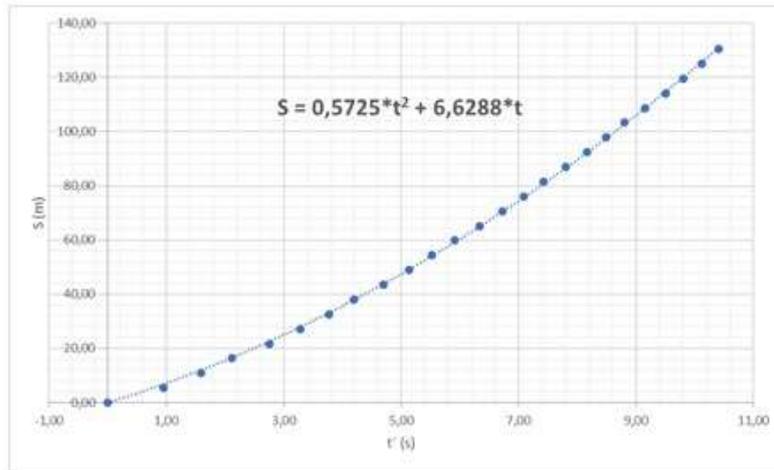


Figura 5 – Gráfico da distância percorrida S versus tempo t' . O gráfico obtido é compatível com o movimento do trem com uma aceleração constante. A equação em destaque corresponde a um ajuste de uma função de grau 2 a partir do método dos mínimos quadrados.

Obtenção da velocidade máxima

A partir do gráfico da Figura 5 e da Tabela 3 é possível obter a velocidade máxima da composição. Para a obtenção desta grandeza, considerou-se o trecho de aceleração em seu instante final do intervalo de tempo considerado. Por sua vez, o valor da velocidade em qualquer instante pode ser obtido com a medida da inclinação de uma reta tangente a um gráfico da posição versus tempo, ou da derivação da equação da posição em função do tempo ou ainda a partir dos dados fornecidos da Tabela 3.

Com a utilização do cálculo diferencial o valor da velocidade instantânea é obtido pela substituição, na expressão da derivada da equação da posição (mostrada no gráfico da Figura 5), do valor do tempo. Esta derivada é dada pela Equação (1)

$$v(t) = 1,145 * t + 6,629 \frac{m}{s} \quad (1).$$

A velocidade instantânea obtida a partir da inclinação da reta tangente ao gráfico da Figura 5, no ponto que corresponde ao tempo de 10,41 s, é mostrada na Figura 6.

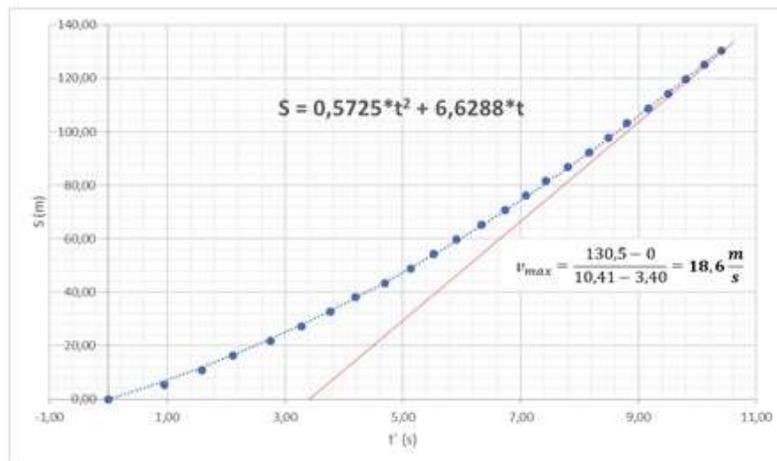


Figura 6 – Obtenção da velocidade máxima a partir da reta tangente. Para calcular este valor foram empregados dois pontos (t' , S): (10,11 s; 130,5 m) e (3,40 s; 0 m).

As velocidades instantâneas mostradas na Tabela 1 foram obtidas a partir da Equação (2)

$$v(t'_i) = \frac{S(t_{i+1}) - S(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (2)$$

em que $S(t_i)$ é a posição no quadro correspondente ao tempo t_i .

A equação (2) utilizada para calcular as velocidades instantâneas considera o conceito geométrico de inclinação de reta tangente. Como em cada ponto pode ser construída uma reta tangente, esta equação utiliza as inclinações das retas tangentes do quadro anterior e do seguinte para calcular a velocidade do quadro. O resultado deste procedimento fornece um valor mais próximo do valor verdadeiro quanto menor é o intervalo de tempo entre os quadros. Na Tabela 4 são mostrados valores de velocidades máximas obtidas a partir da Equação (2).

Amostra	Trem	Data	Horário	Local	Velocidade Máxima (m/s)	Velocidade Máxima (Km/h)	Comprimento do Trem (m)	Tempo Gasto no ponto de medição (s)	Quadros na gravação
1	K 1	22/04/2021	1650	Entre Guilhermina e Vila Matilde sentido Barra Funda	22,911	82,481	130,5	5,70	1367
2	G2	22/04/2021	1651	Entre Vila Matilde e Guilhermina sentido Itaquera	18,800	67,678	130,5	6,94	1666
3	K 1	22/04/2021	1652	Entre Guilhermina e Vila Matilde sentido Barra Funda	15,087	54,312	130,5	8,65	2076
4	G 2	27/04/2021	11:33	Entre Vila Matilde e Guilhermina sentido Itaquera	18,833	67,800	130,5	6,93	1663
5	H 1	27/04/2021	11:33	Entre Guilhermina e Vila Matilde sentido Barra Funda	17,050	61,378	130,5	7,65	1837
6	H 2	27/04/2021	11:36	Entre Vila Matilde e Guilhermina sentido Itaquera	18,811	67,719	130,5	6,94	1665
7	K 1	27/04/2021	11:37	Entre Guilhermina e Vila Matilde sentido Barra Funda	16,803	60,489	130,5	7,77	1864
8	H 2	27/04/2021	11:38	Entre Vila Matilde e Guilhermina sentido Itaquera	18,777	67,597	130,5	6,95	1668
9	K 1	27/04/2021	11:39	Entre Guilhermina e Vila Matilde sentido Barra Funda	17,105	61,579	130,5	7,63	1831
10	K 2	27/04/2021	11:41	Entre Vila Matilde e Guilhermina sentido Itaquera	19,005	68,417	130,5	6,87	1648
Extra 1	H528	27/04/2021	11:34	Entre Tatuapé e Itaquera sentido Luz, Altura de VMD	20,497	73,788	170,55	8,32	1997
Extra 2	H600	27/04/2021	11:35	Entre Itaquera e Tatuapé sentido Luz, Altura de VMD	19,326	69,573	170,55	8,83	2118

Tabela 4 – Velocidades máximas obtidas com a utilização da Equação (2). Os tempos foram obtidos a partir da razão entre a quantidade de quadros e a resolução da câmera (240 quadros/s).

Obtenção da taxa de aceleração

Para a estimativa da taxa de aceleração foi construído um gráfico da velocidade instantânea versus tempo médio a partir dos dados da Tabela 3. O tempo médio de cada quadro é obtido tomando metade da soma do tempo do quadro seguinte e do quadro anterior. Este procedimento está de acordo com a conceito geométrico da reta tangente para minimizar a incerteza no valor do tempo do quadro. A Figura 7 mostra este gráfico.

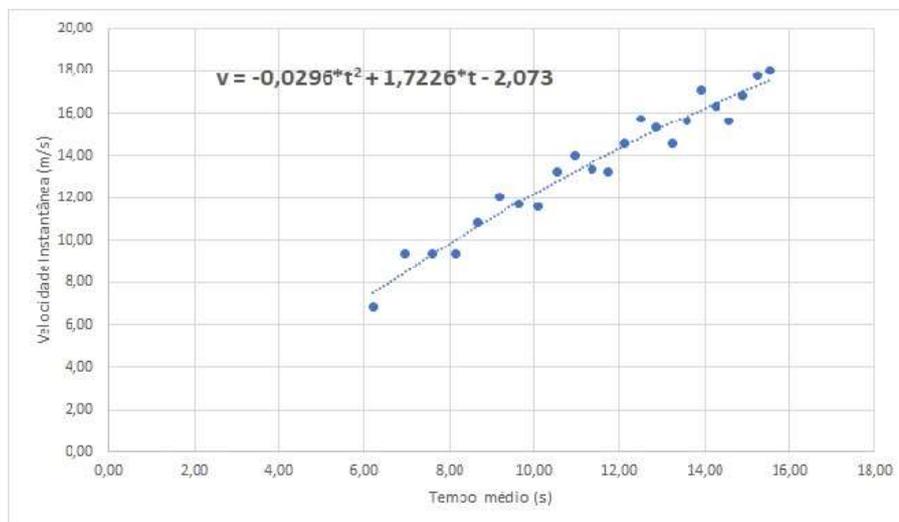


Figura 7 – Gráfico da velocidade instantânea versus tempo médio. A equação mostrada corresponde a um ajuste polinomial de ordem 2 com o método dos mínimos quadrados.

Para uma aceleração constante o gráfico da velocidade em função do tempo deve obedecer a equação de uma reta. O gráfico obtido é compatível com uma equação não linear. A partir do método dos mínimos quadrados constatou-se que a curva que melhor se ajusta aos dados é um polinômio de ordem 2 de acordo com a equação mostrada neste gráfico.

O comportamento não linear da velocidade em função do tempo permitiu investigar a variação da aceleração. Foi construído um gráfico da aceleração versus tempo médio, para tentar estimar a taxa de variação da aceleração como mostra a Figura 8.

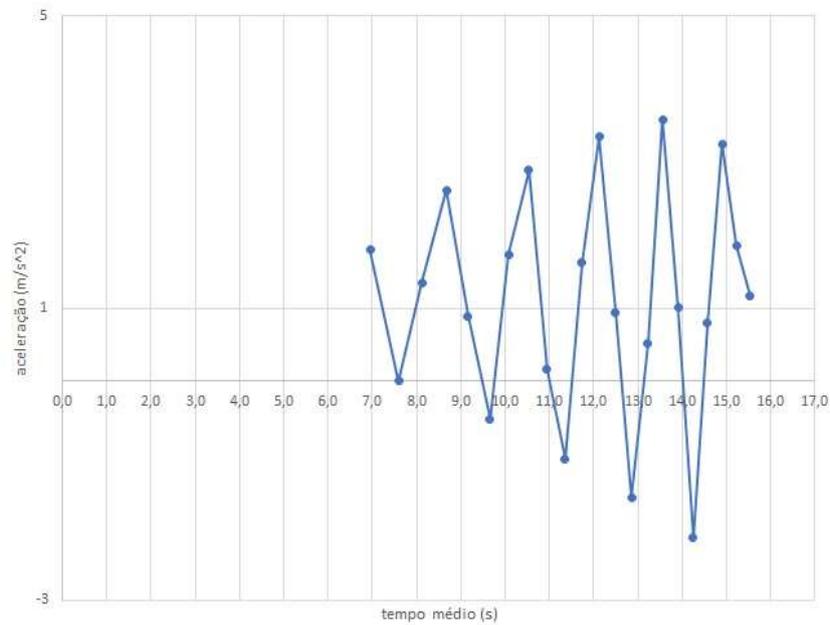


Figura 8 – Variação da aceleração. Os pontos foram conectados por retas, o que se trata de uma suposição de que as variações nos intervalos de tempo curtos sejam constantes.

A partir deste gráfico da aceleração versus tempo médio, inferiu-se uma taxa constante de aceleração no intervalo de tempo entre dois quadros consecutivos. Com esta suposição foi construído um gráfico da variação da aceleração com o tempo médio como mostra a Figura 9.

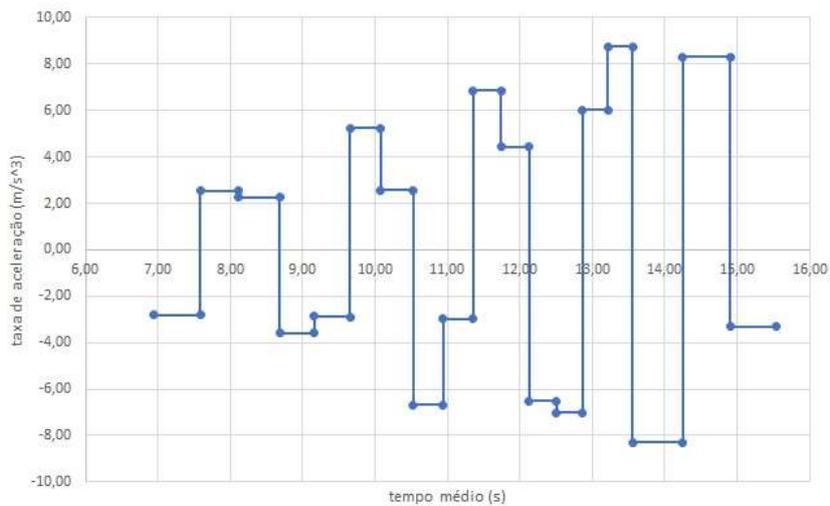


Figura 9 – Taxa de aceleração. Este gráfico mostra as mudanças súbitas das acelerações longitudinais que passageiros foram submetidos e que são utilizadas para averiguar a condição de conforto em termos cinesiográficos.

Obtenção da velocidade média

Para medição da velocidade média, foram realizadas três medições. O procedimento consistiu na cronometragem do tempo transcorrido para a composição se deslocar entre duas estações consecutivas. Esta cronometragem foi realizada no interior da própria composição. As estações nas quais foram realizadas as cronometragens foram: Penha e Carrão. O cronômetro era acionado quando o trem iniciava o seu movimento e era pausado quando entrava em repouso na estação seguinte. A distância entre as duas estações foi obtida com a utilização da ferramenta *Medir Distância* disponível no *Google Maps*. Com as informações do tempo e distância percorrida, foram extraídos os respectivos valores médios e calculou-se a velocidade média como mostra a Tabela 5.

Amostra	Trem	Data	Horário	Local	Distância entre estações (m)	Tempo gasto entre estações (s)
1	H58	11/05/2021	11:37	Entre as estações Penha e Carrão, sentido Barra Funda	2280,40	127,50
2	H62	28/05/2021	14:45	Entre as estações Penha e Carrão, sentido Barra Funda	2280,40	139,88
3	K20	09/06/2021	08:58	Entre as estações Penha e Carrão, sentido Barra Funda	2280,40	145,00
médias =					2280,40	137,46
velocidade média (m/s) =					16,59	
velocidade média (km/h) =					59,72	

Tabela 5 – Medidas de distâncias e tempos entre as estações do metrô de São Paulo: Penha e Carrão. Os valores da velocidade média são obtidos da razão da média das distâncias entre as estações pela média dos tempos.

Resultados e discussão

O gráfico da Figura 5 corresponde a uma parábola com um ajuste polinomial de ordem 2, pelo método dos mínimos quadrados, cuja equação é $S(t) = 0,5725 * t^2 + 6,629 * t$ em unidades do Sistema Internacional (SI). Esta equação corresponde a um movimento retilíneo com aceleração constante da forma $x(t) = x_i + v_i * t + \frac{a*t^2}{2}$. Por comparação dos termos a aceleração longitudinal média é de

$$a = 1,14 \frac{m}{s^2} \quad (3).$$

A velocidade máxima obtida com a medida da inclinação da reta tangente como mostrado no gráfico da Figura 6 é

$$v_{max} = 18,6 \frac{m}{s} \quad (4).$$

Com a utilização da Equação (1) no instante 10,41 s o valor obtido para a velocidade máxima é

$$v_{max} = 1,145 * 10,41 + 6,629 = 18,5 \frac{m}{s} \quad (5).$$

A velocidade máxima obtida da Tabela 1 corresponde ao instante 10,11 s, cujo valor é

$$v_{max} = 18,0 \frac{m}{s} \quad (6).$$

A taxa de aceleração foi obtida do gráfico da Figura 9. O maior valor em módulo obtido foi de

$$\dot{a} = 8,30 \frac{m}{s^3} \quad (7).$$

Conclusões

O valor obtido para a aceleração dado pela Equação (3), $1,14 \text{ m/s}^2$, mostrou-se compatível com o valor teórico de $1,11 \text{ m/s}^2$ para a aceleração longitudinal média máxima. O resultado correspondeu a um erro relativo de 2,7%. A média das velocidades máximas, 18,4 m/s, comparada com o valor teórico de 24,2 m/s, correspondeu a um erro relativo de 24%. A discrepância deste resultado pode ser explicada pelo fato de que as filmagens não consideraram o percurso inteiro do trem e possivelmente foi registrado um intervalo de tempo no qual o trem ainda estava em aceleração. O módulo da taxa de aceleração longitudinal máxima foi de $8,30 \text{ m/s}^3$ que corresponde a 0,85 g/s e está acima

do valor máximo considerado para uma viagem de conforto e permanecer em pé numa situação de equilíbrio. No entanto o gráfico da variação da aceleração mostrado na Figura 9 indica que os valores das variações das acelerações foram aumentando com o tempo e atingindo o valor máximo no intervalo de tempo final. Este resultado reflete que o aumento da velocidade da composição provoca variações súbitas mais intensas das acelerações.

Para prevenir a possibilidade de quedas no interior das composições, atualmente as composições instalaram alças para os passageiros não sofrerem possíveis quedas no interior das composições, com estes efeitos das variações súbitas das acelerações.

A velocidade média obtida, 16,6 m/s, não tem uma medição teórica pois depende do funcionamento normal do metrô.

É necessário considerar um trecho maior do deslocamento das composições. No entanto, o método apresentado pode ser aplicado a partir de imagens com um campo visual maior, isto é, posicionando o drone numa altura maior. A análise das imagens mostrou ser um método viável.

Referências bibliográficas e bibliografia

BORTOLOTTI, T. B.; CARVALHO, I. F. de; FONSECA, L. C. S.; SCHEICHER, M. E. **Posturografia em idosos praticantes de atividade física: influência dos sistemas sensoriais.** Revista Brasileira de Educação Física e Esporte, [S. l.], v. 32, n. 4, p. 633-638, 2018. DOI: 10.11606/issn.1981-4690.v32i4p633-638. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rbefe/article/view/170210>. Acesso em: 26 jul. 2021.

GEORGE, T.K et al. **Sensing discomfort of standing passengers in public rail transportation systems using a smart phone.** 10th IEEE International Conference on Control & Automation (IEEE ICCA 2013), HangZhou China, June 12-14, 2013, pp. 1509-1513.

GREGERSEN, E. **Acceleration Stress.** [online]. Fevereiro 2015 <<https://www.britannica.com/print/article/2846>>. Acesso em 23/07/2021.

HOBEROCK, L.L. **A survey of longitudinal acceleration comfort studies in ground transportation vehicles.** Research Report 40, Council for Advanced Transportation Studies, 1976.

IBOPE. **Pesquisa de opinião pública sobre mobilidade urbana.** [online] <<https://www.nossasaopaulo.org.br/portal/arquivos/pesquisa-tabelas-2017.pdf>>.

MARTIN, D.; LITWHILER, D. **An investigation of acceleration and jerks profiles of public transportation vehicles**. American Society for Engineering Education, 2008.

POWELL, J.P.; PALACÍN, R. **Passenger Stability Within Moving Railway Vehicles: Limits on Maximum Longitudinal Acceleration**. Urban Rail Transit p. 95 – 103, 2015.

RODRÍGUEZ, A. et al. **Smartphones and tablets applications in railways, ride comfort and track quality. Transitions zone analysis**. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation v.182, (2021).

ZOCCALI, P. et al. **Acceleration measurements inside vehicles: Passengers' comfort mapping on railways**. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. v.129, (2018).

Enviado em: 06/01/2021