

Alunos: Carlos Fernandes Alfano Junior
João Vitor Cato Pansiera
Tiago Benjamim Monteiro

Orientador: Cyro Albuquerque Neto - cyroan@fei.edu.br



ESTUDO DO EFEITO AERODINÂMICO SOBRE AS PORTAS DE PLATAFORMAS APÓS A PASSAGEM DE TRENS EM TÚNEIS SUBTERRÂNEOS: um estudo em parceria com o Metrô de São Paulo

1. INTRODUÇÃO

A utilização de portas no controle de acesso às vias ferroviárias, também conhecidas como PSDs (Platform Screen Doors), vem se tornando cada vez mais comum. Atualmente, se tratando de sistemas de segurança para evitar a entrada indesejada de objetos na via, as PSDs são a solução mais adotada em todo o mundo, especialmente nas linhas automatizadas de metrô (linhas onde não há a necessidade de um maquinista ou operador no sistema de controle interno do carro). Analisando este tipo de configuração metroviária no mundo, 77% das estações utilizam PSDs como sistema de segurança nas plataformas, sendo que 87% destas estações foram construídas ainda na última década.

Em São Paulo, onde, em média, 2,8 milhões de passageiros circulam todos os dias, a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) chegou a registrar mais de mil acidentes em um único ano (FOLHA DE SÃO PAULO, 2022). Desta forma, a utilização das PSDs tornou-se uma preocupação pública e governamental à medida em que houve um aumento no uso de trens para o transporte nas grandes metrópoles, como São Paulo e outras cidades do mundo. Entretanto, existem ainda outros benefícios na utilização destes sistemas, dos quais pode-se destacar a prevenção à atos de suicídio (UEDA; SAWADA; MATSUBAYASHI, 2015), melhora na qualidade do ar na região das plataformas (SON; JEON; KIM, 2014), redução do impacto sonoro (SOETA; SHIMOKURA, 2012), aumento na velocidade de operação (CPTM, 2022) entre outros.

As PSDs dividem-se em três versões principais: *full-closed* (fechadas até o teto da estação), *semi-closed* (fechadas até metade da altura da estação) e *halfscreen* (fechadas até altura da cintura do passageiro).

2. MOTIVAÇÃO

Segundo informações do Metrô de São Paulo, atualmente dois contratos estão assinados para fornecimento de novas portas, sendo o primeiro para instalação de 12 portas em estações terminais (abertas) e o segundo para a instalação de 88 portas em estações de superfície e subterrâneas (fechadas). Devido ao elevado número de PSDs a serem instaladas, é crucial validar estruturalmente que a tecnologia seja capaz de atender às demandas diárias de aplicação nas estações que compõem a malha metroviária de São Paulo. Sendo assim, embora o Metrô de São Paulo já tenha adquirido as PSDs mencionadas anteriormente, a organização desenvolveu ao longo do projeto estudos dimensionais e pesquisas envolvendo tempo de fadiga, bem como um conjunto de estudos no campo da análise estrutural para validar a montagem mecânica e o tempo de vida das portas nos cenários de carregamentos estáticos e dinâmicos pertinentes às condições de utilização do Metrô em São Paulo.

Ao longo dos estudos de verificação estrutural das PSDs realizados pelo Metrô de São Paulo, 7 cenários de carregamentos estáticos e dinâmicos foram levados em consideração: peso da estrutura; carga da multidão; carga de impacto; cargas incidentes; análise modal; fadiga de componentes mecânicos; e pressão do escoamento de ar sobre as portas. Dos 7 cenários considerados, 6 deles já tiveram seus modelos validados e calibrados considerando métodos analíticos, empíricos e semi-empíricos das condições de uso reais de São Paulo. Todavia, no que diz respeito ao efeito da pressão do escoamento de ar sobre as portas de plataformas, os valores utilizados como base para os cálculos estruturais ainda não foram aplicados. Por conseguinte, uma verificação da pressão gerada pelo escoamento sobre as portas de plataformas considerando não só uma das estações de São Paulo, mas também uma das diversas geometrias frontais de trens (máscaras) que compõem a frota metroviária é necessária para embasar cálculos estruturais mais próximos à realidade.

3. OBJETIVOS

O estudo tem como objetivo geral estimar níveis realistas de pressão aerodinâmica exercida sobre as portas de plataformas durante a passagem dos trens em plataformas subterrâneas. O estudo será orientado ao fornecimento de dados suficientemente precisos para auxiliar a equipe de engenharia do Metrô de São Paulo na validação do tempo de vida das PSDs.

Para isso será desenvolvida uma análise de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) e executar testes experimentais que representem a movimentação de um trem em uma condição crítica de operação. Sendo que os resultados serão fornecidos ao Metrô de São Paulo para auxílio na validação ou recálculo do tempo de vida estimado das portas de plataforma.

4. EFEITO PISTÃO

O efeito pistão é um fenômeno da mecânica dos fluidos caracterizado pela concentração de fluido em alta pressão na região frontal de um corpo que se movimenta no interior de um ambiente confinado (um túnel, por exemplo), enquanto a parte traseira deste mesmo corpo sofre com a formação de uma região de vórtices de pressão negativa (PAN et al., 2013). O mecanismo de formação do efeito pistão é baseado na dificuldade do escoamento em fluir livremente da região frontal para a traseira do corpo dada a imposição das restrições de espaço de um ambiente confinado.

A importância do efeito pistão nos estudos dos efeitos aerodinâmicos nas portas de plataformas reside no fato de que a alta pressão carregada pelo corpo em movimento é descarregada de forma abrupta quando esta deixa o ambiente confinado, podendo causar danos a objetos ou pessoas ao redor.

Alunos: Carlos Fernandes Alfano Junior
João Vitor Cato Pansiera
Tiago Benjamim Monteiro

Orientador: Cyro Albuquerque Neto - cyroan@fei.edu.br



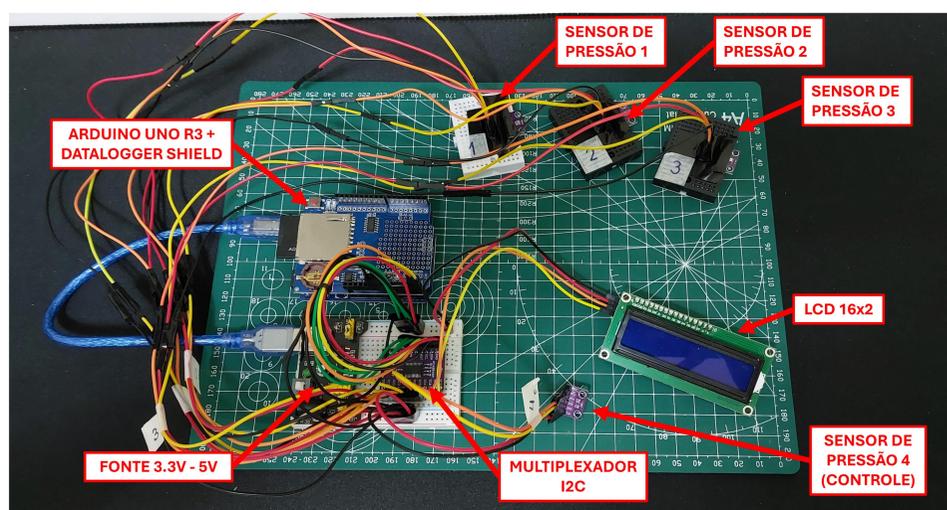
5. MÉTODOS

5.1. EXPERIMENTAL

Para a execução de testes experimentais foi adotado como principal método o desenvolvimento de um sistema de telemetria que seria instalado diretamente nas portas de plataforma da estação crítica definida pelo Metrô de São Paulo com o objetivo de coletar ao longo do tempo a pressão exercida pela passagem dos trens sobre as PSDs. Este desenvolvimento levou em consideração três requisitos essenciais: os dados de pressão deveriam ser coletados em pelo menos um dos horários de pico de funcionamento do metrô; os componentes utilizados deveriam ser simples para que pudessem ser replicados com facilidade em estudos futuros; e o sistema deveria suportar um dia inteiro de funcionamento para não causar interferência nas vias e na operação dos trens.

O circuito da telemetria é elaborado em torno do conjunto de quatro sensores de pressão barométrica absoluta do tipo BMP280 baseados em comunicação I2C, conectados a um multiplexador (divisor) de canais I2C, que permite a leitura de múltiplos sensores simultaneamente utilizando poucas portas analógicas de uma placa Arduino Uno R3. Os dados coletados pelos sensores são armazenados automaticamente em um cartão micro SD presente em uma armadura para Arduino do tipo datalogger, a qual permite gravar também o horário das medições com um módulo RTC (Real Time Clock). Um módulo LCD de tamanho 16 colunas por 2 linhas é adicionado ao circuito para permitir a leitura em tempo real dos dados coletados. A alimentação do sistema é controlada por fonte reguladora de tensão com barramentos de 3.3V e 5V separados, pois cada componente deve ser ligado à tensão indicada pelo fabricante para funcionar corretamente. A cablagem do conjunto é feita utilizando jumpers do tipo macho-macho, fêmea-fêmea e macho-fêmea na configuração para reduzir ao máximo a quantidade de cabos utilizados, buscando evitar falhas de comunicação entre o Arduino e os sensores. O circuito descrito pode ser encontrado na Figura 1. Toda a programação do sistema foi feita na linguagem Arduino e foram adicionados filtros de dados para limpeza dos ruídos de medição, assim garantindo maior qualidade na análise dos resultados experimentais obtidos

Figura 1 - Esquemático representativo do sistema de telemetria



Fonte: Autores, 2024

Em posse do sistema de telemetria montado e funcional, foi previsto um conjunto de testes empíricos para coleta da pressão de passagem dos trens nas situações reais de operação do metrô de São Paulo. Idealmente, os testes empíricos seriam realizados na estação Santa Cecília da linha vermelha do Metrô de São Paulo. Esta estação é considerada pela empresa a situação crítica para avaliação do tempo de vida das PSDs em função do alto confinamento do ambiente, o que poderia potencializar o efeito pistão. Entretanto, até março de 2024 a instalação das portas ainda não havia sido realizada e a estação Jabaquara, que possui PSDs instaladas, foi considerada como substituta para execução dos testes. Como não há semelhança completa entre as estações, os resultados empíricos obtidos nesta fase não podem ser extrapolados diretamente para a estação Santa Cecília e uma fase intermediária de validação através de métodos computacionais é necessária

5.2. COMPUTACIONAL

Os métodos computacionais baseiam-se na execução de simulações em CFD em regime transiente (dependente do tempo). Com base nos desenhos técnicos fornecidos pelo Metrô de São Paulo, foram modelados em software de CAD (*Computer Aided Design*), em tamanho real, cinco dos principais modelos de trens em operação atualmente. Sabendo que os resultados finais do estudo devem ser apresentados em relação à estação Santa Cecília e que a estação Jabaquara será utilizada para validar o método computacional, ambas as estações foram modeladas em CAD para serem utilizadas nas simulações em CFD posteriores.

As análises transientes foram realizadas utilizando o módulo CFX do software Ansys Workbench 2022 R1. A geração da malha do modelo foi realizada individualmente para cada sólido (domínio da estação e trem). Optou-se pela utilização da malha do tipo tetraédrica para a estação, devido a geometria ser constituída principalmente por linha retas e grandes dimensões. A discretização do volume de controle foi realizada utilizando elementos lineares com tamanho de elemento de 100mm para o trem e 400mm para a estação. As condições de contorno foram selecionadas de modo a ilustrar as condições reais obtidas durante os testes. A estação foi definida como sendo um domínio de fluido, preenchido por gás real (ar) em regime isotérmico à temperatura de 25°C. A geometria do trem foi definida como sendo um sólido imerso no domínio da estação e as faces da geometria do trem foram definidas como elementos de parede. O deslocamento do trem foi considerado na direção Y, com sentido a entrar na estação. Sua velocidade foi definida como constante e igual a 100 km/h (caso mais crítico fornecido pelo Metrô de São Paulo) para a estação Santa Cecília. No caso da simulação para a estação Jabaquara, considerou-se o caso de desaceleração do trem até parada completa, assim reproduzindo os testes experimentais realizados. Optou-se em todas as simulações por utilizar o modelo de turbulência SST (*Shear Stress Transport*) devido a simulação não apresentar geometrias altamente complexas, grandes gradientes de velocidade e sistema incompressível sem a presença de escoamento transacional. O objetivo de sucesso da simulação foi obter erro residual da solução menor ou igual a 1×10^{-4} .



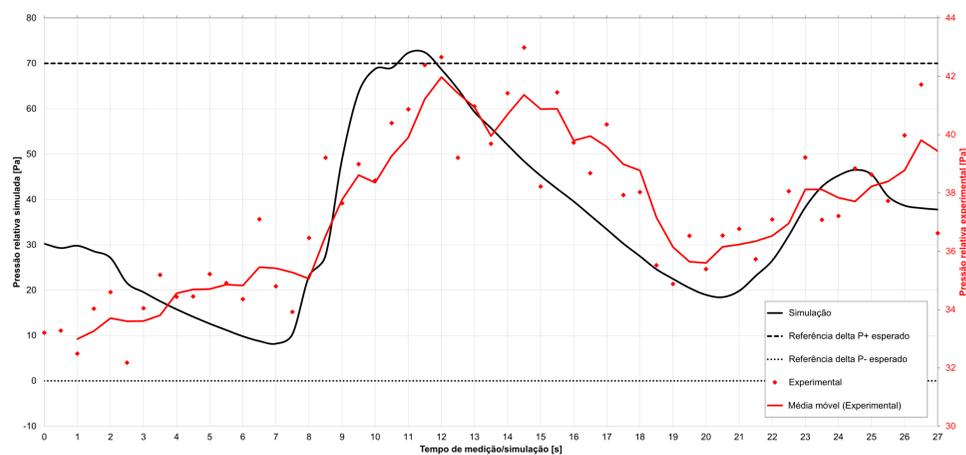
6. RESULTADOS

6.1. COMPARAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO E SIMULAÇÃO DA ESTAÇÃO JABAQUARA

Com base nos gráficos dos resultados dos testes experimentais e da simulação da estação Jabaquara, foi analisada a correlação entre eles a partir da sobreposição das curvas obtidas. Desta forma, pretende-se verificar a semelhança entre os resultados tanto em comportamento quanto em valores numéricos, permitindo validar o método e as condições de contorno aplicadas na simulação.

A Figura 2 ilustra a comparação direta entre os resultados experimentais e simulados da estação Jabaquara. O eixo vertical dos valores de pressão relativa foi plotado separadamente para evidenciar o comportamento das curvas obtidas. Neste mesmo gráfico também foram incluídas as retas de referência da pressão máxima e mínima considerando as variações de pressão positiva e negativa esperadas. Através do gráfico fica evidente a semelhança entre o comportamento da curva de pressão experimental e simulada, confirmando que a metodologia aplicada na simulação alcançou resultados que capturaram a dinâmica real da passagem do trem pela plataforma.

Figura 2 - Comparação experimento e simulação – Jabaquara



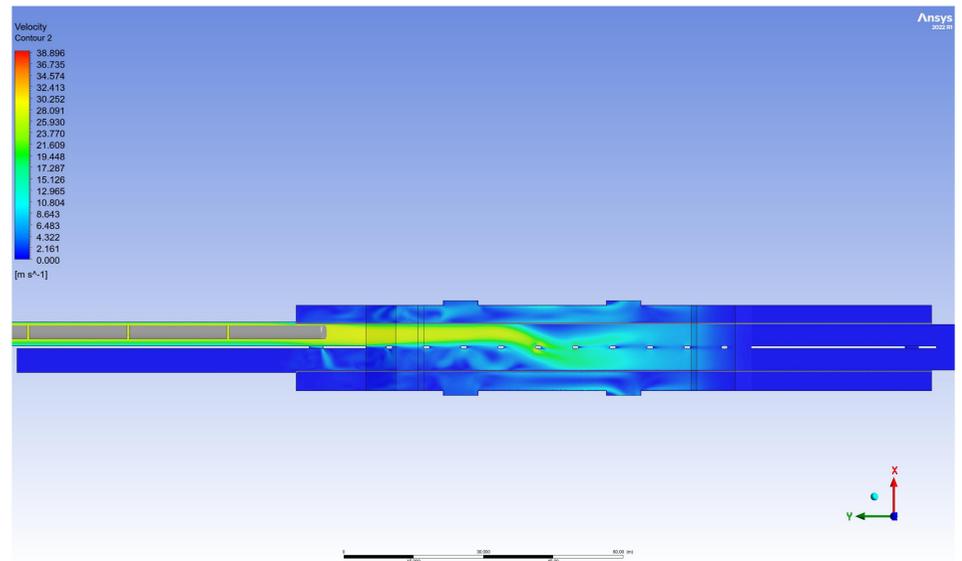
Fonte: Autores, 2024

6.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NA ESTAÇÃO SANTA CECÍLIA

Como o método da simulação computacional foi validado através dos testes experimentais e computacionais na estação Jabaquara, os mesmos foram replicados para execução da simulação na estação Santa Cecília.

A visualização do campo de velocidades do escoamento no momento de saída do túnel (Figura 3) permite identificar que o ar concentra-se na região frontal do trem e dissipa-se pouco para plataforma na qual ficam os passageiros e para o túnel vizinho, sendo que a massa de ar é predominante mais veloz no sentido e direção da movimentação do trem. Este fato indica que a ocorrência do efeito pistão foi potencializada na estação Santa Cecília em comparação à estação Jabaquara, reforçando a criticidade da análise neste ambiente conforme orientado pelo Metrô de São Paulo. O erro residual da simulação manteve-se abaixo de 1×10^{-4} , conforme objetivado nos métodos aplicados.

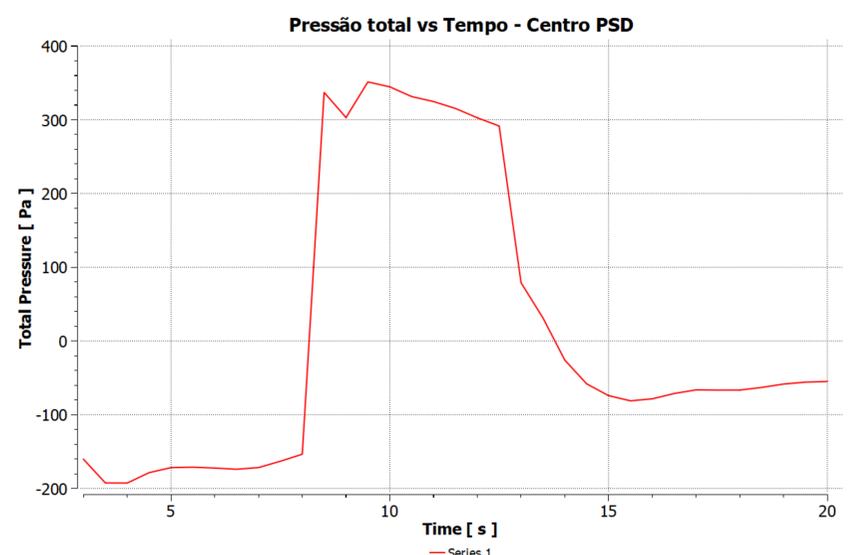
Figura 3 – Campo de velocidades – Santa Cecília



Fonte: Autores, 2024

Os resultados finais da pressão obtida na simulação da estação Santa Cecília são apresentados na Figura 4, sendo que a variação positiva máxima de pressão foi de 500 Pa e a variação negativa máxima foi de -350 Pa. Estes foram os valores numéricos transmitidos ao Metrô de São Paulo para utilização nos cálculos analíticos de validação estrutural e estimativa do tempo de vida das portas de plataformas instaladas atualmente, conforme objetivado neste trabalho.

Figura 3 – Gráfico da pressão obtida na simulação - Santa Cecília



Fonte: Autores, 2024

7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos são sustentados pela correlação empírica, através de telemetria com sensores de pressão, e numérica, através de simulação em CFD, realizada na estação Jabaquara. A equipe de engenharia do Metrô de São Paulo aprovou os métodos e os resultados obtidos e partir dos dados das simulações da estação Santa Cecília executou cálculos analíticos estruturais, utilizando memorial de cálculo próprio, que indicaram vida infinita sob carregamentos cíclicos (fadiga) para as portas de plataforma instaladas em todo o sistema até o momento. Desta forma, considera-se que todos os objetivos do projeto foram alcançados com sucesso.