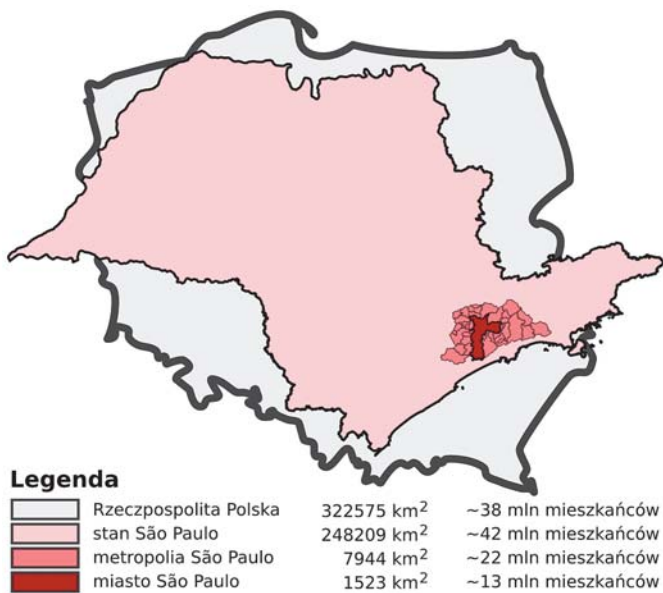


Linia metra nr 4 w São Paulo

dr inż. Mirosław J. Nowakowski, Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego

São Paulo o powierzchni niewiele większej od województwa opolskiego zamieszkuje 10-krotnie więcej ludności. Mamy więc tu do czynienia z ogromnym obszarem oraz populacją. Kolejny aspekt to rzeźba terenu – największe miasto Brazylii leży na wysokości 700–900 m n.p.m., a lokalne różnice wysokości są w wielu miejscach bardzo duże.

Sprawny transport w tak wielkim, silnie zurbanizowanym i uprzemysłowionym organizmie miejskim ma wielkie znaczenie. Lokalne władze, doceniając wagę problemu, dużą uwagę poświęcają rozwojowi komunikacji szynowej. Skalę problemu stojącego przed systemem komunikacyjnym oddaje w części rycina 1.



Ryc. 1. Porównanie powierzchni oraz populacji stanu i miasta São Paulo z powierzchnią Polski na podstawie [1, 2]

W granicach miasta São Paulo funkcjonują i wzajemnie się uzupełniają dwa jej systemy:

- naziemna szybka kolej miejska CPTM (port. *Companhia Paulista de Trens Metropolitanos*), o długości ok. 260 km, przewożąca w ciągu doby 2,2 mln pasażerów
- metro (port. *Metropolitano de São Paulo*, w skrócie Metrô), o długości ok. 90 km, przewożąca w ciągu doby 4 mln pasażerów.

Linie te (tab. 1) wraz ze specjalnym korytarzem autobusowym komunikacji podmiejskiej tworzą spójny, uzupełniający się i współpracujący ze sobą system. Pociągi kursują na nich codziennie, przez cały rok, przez 20 godzin na dobę.

Tab.1. Linie miejskiego transportu szynowego w São Paulo

Linia	System	Długość [km]	Liczba stacji
Linia 1 Azul	Metrô	20,2	23
Linia 2 Verde	Metrô	14,6	13
Linia 3 Vermelha	Metrô	22,0	18
Linia 4 Amarela	Metrô	12,8	11
Linia 5 Lilás	Metrô	8,4	6
Linia 7 Rubi	CPTM	60,5	19
Linia 8 Diamante	CPTM	41,7	24
Linia 9 Esmeralda	CPTM	31,8	18
Linia 10 Turquesa	CPTM	37,2	14
Linia 11 Coral	CPTM	50,8	17
Linia 12 Safira	CPTM	38,8	16

Dla ułatwienia orientacji wszystkie wchodzące w skład systemu linie kolejowe są oznaczone numerem oraz kolorem, które łącznie stanowią nazwę linii. Odpowiednie akcenty kolorystyczne dominują także na stacjach położonych na danej linii.

Linie Metrô funkcjonujące w São Paulo

Linie Metrô funkcjonują jedynie w centralnej oraz północnej części miasta i nie obejmują swoim zasięgiem tzw. Zony Sul, w skład której wchodzi dzielnice M'Boi Mirim, Socorro, Cidade Ademar, Perelheiros oraz Campo Limpo, o charakterze przede wszystkim przemysłowym. Poszczególne linie powstawały kolejno w ciągu przeszło 35 lat. W tak długim okresie zmieniały się warunki ekonomiczno-polityczne oraz technika transportowa. Dlatego poszczególne linie są w wysokim stopniu odizolowane od siebie, różniąc się m.in. takimi parametrami, jak szerokość toru, prędkość operacyjna czy system zasilania [4]. I tak, najnowsze linie nr 4 oraz 5 mają tor o prześwicie 1435 mm, osiągają prędkość 80 km/h i są zasilane za pomocą trakcji górnej, pozostałe linie poruszają się po torze o szerokości 1600 mm, rozpędzają się do 100 km/h i korzystają z trakcji dolnej, tzw. trzeciej szyny.

Najstarsza linia 1 Azul (Niebieska – ryc. 2) działa od 1974 r. Przebiega przez centrum miasta w kierunku południkowym i łączy położone po przeciwnych stronach metropolii dzielnice Santana oraz Jabaquara [4, 5]. Jedną z jej stacji końcowych – terminal Jabaquara obsługujący w szczycie 30 tys. pasażerów/godz. – jest najdalej na południe położoną stacją metra i stanowi równocześnie ważny węzeł integracyjny, umożliwiającą przesiadkę na autobusy międzymiastowe, kursujące m.in. w kierunku położonego na wybrzeżu Oceanu Atlantyckiego portu Santos. Tu też znajduje się duża stacja postojowa i warsztaty naprawy taboru kolejowego. Godny odnotowania jest fakt, że ze względu na bardzo urozmaiconą rzeźbę terenu stacja ta jest częściowo położona na nasypie o wysokości 12 m, a częściowo w wykopie o głębokości 10 m [4].



Ryc. 2. Schemat istniejących w São Paulo linii metra [3]

Linia 1 Azul krzyżuje się z dwoma innymi liniami: linią 2 Verde (obie linie na odcinku między stacjami Ana Rosa i Paraiso przebiegają równolegle do siebie, chociaż w osobnych tunelach) oraz linią 3 Vermelha. Położona w centrum miasta, na skrzyżowaniu linii 1 i 3, stacja Sé jest najbardziej obciążoną stacją na linii Azul i w ogóle na całej sieci Metrô. W szczycie komunikacyjnym obsługuje 100 tys. pasażerów/godz. [4, 5].

Budowie przebiegającej równoleżnikowo linii 2 Verde przyświecała idea udroźnienia miejskiego systemu transportowego w położonym w centrum miasta rejonie Avenida Paulista. Linia przebiega w bardzo urozmaiconym terenie, o czym najlepiej świadczy fakt, że perony terminala Tamanduatei leżą na powierzchni terenu, perony następnej stacji (Vila Prudente) na głębokości 14,0 m, a perony czwartej z kolei stacji Alto Ipiranga — 24,16 m poniżej powierzchni terenu [3]. Na linii najbardziej obciążone są stacje położone na skrzyżowaniu z linią 1 — Ana Rosa i Paraiso. W szczycie każda z nich obsługuje 40 tys. pasażerów/godz.

Linia 3 Vermelha — podobnie jak linia 2 Verde — przebiega w kierunku równoleżnikowym, łącząc najważniejsze punkty w centrum miasta, począwszy od centrum kulturalnego Memorial da América Latina na zachodzie, przez Praça da República oraz Praça da Sé w centrum, aż do Corinthians we wschodniej części miasta. Linia jest bardzo silnie zintegrowana z innymi trasami szynowego transportu miejskiego. Położony na zachodzie węzeł Palmeiras Barra Funda łączy linię 3 z dwiema liniami kolei CPTM oraz dworcami autobusowego transportu miejskiego i międzymiastowego. Zbudowany na wschodnim końcu linii węzeł Corinthians Itaquera łączy linię metra z jedną linią CPTM i miejskim dworcem autobusowym. Przez każdy z nich w godzinach szczytu przewija się po 60 tys. pasażerów/godz. Węzeł Brás (60 tys. pasażerów/godz.) integruje metro z trzema liniami kolei CPTM. Węzeł Tatuapé stanowi połączenie omawianej linii z dwoma liniami CPTM i dworcem autobusowym. Stacja República (80 tys. pasażerów /godz.) po rozbudowie łączy linie metra 3 i 4, i wreszcie wspomnianą już stacją Sé umożliwia przesiadkę z linii 3 na linię 1 (100 tys. pasażerów/godz.) [4, 5]. Na całej długości linii funkcji integracyjnych z innymi rodzajami transportu nie pełnią zaledwie trzy z 18 stacji.



Ryc. 3. Stacja Santo Amaro na linii 5 Lilás

Budowa linii 5 Lilás, położonej na uboczu w stosunku do pozostałych linii, miała na celu ożywienie najbardziej zacofanego rejonu metropolii São Paulo – dzielnic Capão Redondo, Capela do Socorro, Campo Limpo, Rio Pequeno, Grajaú, Piraporinha, okolic Santo Amaro oraz sąsiadujących z nimi miast Embu, Taboão i Itapeerica da Serra [3, 4]. Sama linia z klasycznie

rozumianym metrem (kojarzonym z podziemnym położeniem nawierzchni) ma niewiele wspólnego, gdyż na długości 7 km przebiega na estakadach, 1 km po powierzchni ziemi, a jedynie 0,85 km położonych jest pod ziemią. Wizytówką linii jest najbardziej obciążona na niej ruchem stacja Santo Amaro (25 tys. pasażerów/godz. w szczycie) położona na długim, 220-metrowym moście nad rzeką Pinheiros [3]. Główne przesłone mostu ma długość 122 m i jest podwieszona wantowo na pojedynczym pylonie o wysokości 64 m (ryc. 3). Linia jest obecnie zintegrowana tylko z jedną linią transportu szynowego — linią 9 Esmeralda systemu CPTM. Ten stan rzeczy ulegnie zmianie po zainicjowanej właśnie rozbudowie linii, w wyniku której powstaną węzły integracyjne na stacji Vera Cruz na linii 1 Azul oraz stacji Chácara Klabin na linii 2 Verde.

W kontekście linii 5 trudno nie wspomnieć, że nietypowy jak na metro przebieg względem powierzchni terenu nie jest w São Paulo wyłącznie jej cechą. Duże lokalne różnice wysokości sprawiają, że pozostałe linie także często wyłaniają się na powierzchnię. Można to prześledzić na zestawieniu stacji z poszczególnych linii, w którym kryterium podziału stanowi położenie peronów względem powierzchni terenu (tab. 2).

Tab. 2. Położenie stacji względem powierzchni terenu na poszczególnych liniach metra w São Paulo

Linia	Stacje podziemne	Stacje naziemne	Stacje nadziemne	Razem
Linia 1 Azul	18	0	5	23
Linia 2 Verde	11	2	1	14
Linia 3 Vermelha	6	8	4	18
Linia 4 Amarela	10	1	0	11
Linia 5 Lilás	1	0	5	6

Linia 4 Amarela (Żółta)

Podstawowe parametry techniczne linii 4 Amarela zawarto w tablicy 3. Jej centralna sekcja o długości 3,6 km, położona między stacjami Paulista i Faria Lima, została oficjalnie otwarta 25 maja 2010 r. Obecnie nie jest jeszcze normalnie eksploatowana. Od poniedziałku do piątku w godz. 9.00–15.00, kursuje po niej w celach testowych oraz turystyczno-reklamowych tylko jedna para pociągów [3]. Ma to na celu zapoznanie mieszkańców z zupełnie nową, niespotykaną na pozostałych liniach technologią przewozów za pomocą składów sterowanych komputerowo (bez udziału maszynistów). Równocześnie na wymienionym odcinku prowadzone są prace wykończeniowe na dwóch kolejnych stacjach. Trwają też prace wyposażeniowe na pozostałych, wyodrębnionych już w całości odcinkach linii.

Tab. 3. Podstawowe parametry linii 4 Amarela

Parametr	Wartość	
Szerokość toru	1435	mm
Rozstaw osi na szlaku	3,5	m
Typ szyn	UIC60	
Szybkość	80	km/h
Minimalny promień łuku poziomego	350	m
Maksymalny promień łuku poziomego	1000	m
Minimalny promień łuku pionowego	1500	m
Maksymalny promień łuku pionowego	5000	m
Pochylenie na linii	40	
Pochylenie na stacji	0	
Krzywa przejściowa	klotoida	
Rozjazdy w przejściach trapezowych	UIC60 190-1:9	

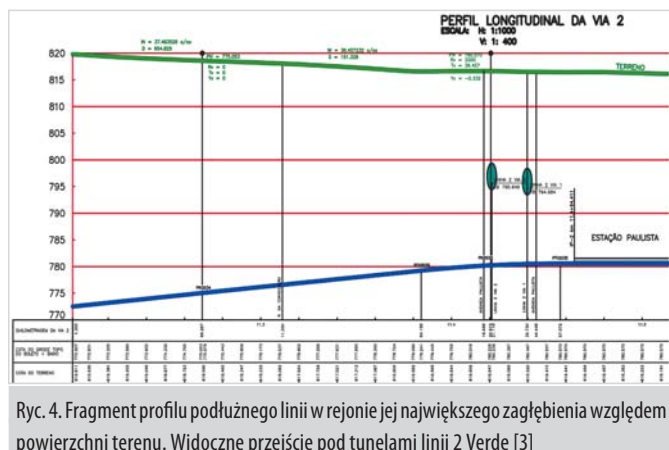
Po ukończeniu linia docelowo połączy zlokalizowaną w centrum miasta stację Luz z rejonem kampusu uniwersyteckiego oraz dzielnicą Morumbi. W ten sposób zapewnione zostanie sprawne połączenie między trzema innymi liniami metra, a także z kilkoma liniami sieci CPTM. Duże nadzieje wiązane są także z przewidywanym odciążeniem stacji Sé.

Integracja linii 4 Amarela z innymi liniami Metrô i CPTM będzie wyglądać następująco:

- Stacja Luz – połączenie z linią 1 Azul Metrô oraz liniami 7, 10 i 11 CPTM
- Stacja República – połączenie z linią 3 Vermelha Metrô
- Stacja Paulista – połączenie z linią 2 Verde Metrô za pomocą podziemnego przejścia prowadzącego do stacji Consolação na linii 2)
- Stacja Pinheiros – połączenie z linią 9 Esmeralda CPTM.

Ponadto stacje Faria Lima oraz Butantã będą stanowiły węzły integracyjne z miejskim transportem autobusowym, a terminal Vila Sônia – z autobusowym transportem międzymiastowym.

Na linii zastosowano nawierzchnię niekonwencjonalną, z przytwierdzeniami mocowanymi bezpośrednio do płyt opartych – za pomocą spiralnych sprężyn i maty wibroizolacyjnej – na „podłodze” tunelu. W celu uzyskania jak największej spokojności jazdy w przejściach trapezowych ułożono rozjazdy UIC60-190-1:9 o krzyżownicach z ruchomymi dziobami.



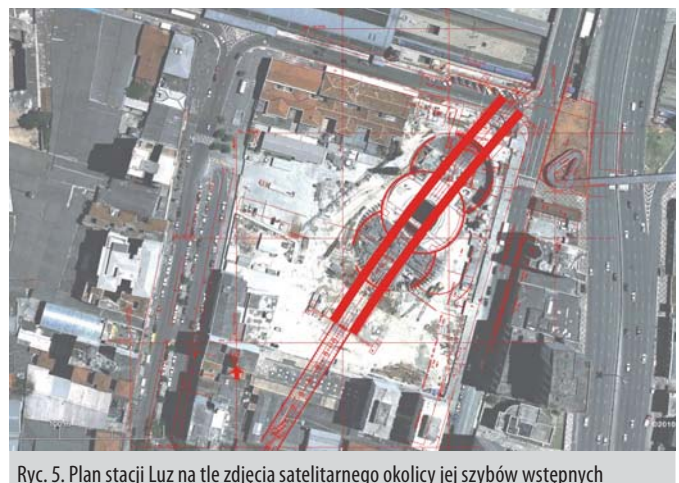
Ryc. 4. Fragment profilu podłużnego linii w rejonie jej największego zagłębienia względem powierzchni terenu. Widoczne przejście pod tunelami linii 2 Verde [3]

Budowa linii nastęrczała wiele problemów, wynikających przede wszystkim z warunków wodnogruntowych oraz z prowadzenia przeszło połowy linii w najsilniej zurbanizowanej części miasta, pod alejami Ipiranga, Consolação, Rebouças i Francisco Morato, a także z przejściem linii pod rzeką Pinheiros. Pewne pojęcie o skali problemu daje rycina 4, na której przedstawiono profil jednego toru linii w rejonie skrzyżowania z linią 2 Verde. Stacja Paulista jest jedną z dwóch (obok stacji Pinheiros) najbardziej zagłębionych stacji na tej linii. Niweleta główki szyny leży na niej niemal 36 m poniżej powierzchni terenu. Zagłębienie samej linii na odcinku od stacji Paulista w stronę stacji Oscar Freire powiększa się jeszcze bardziej, osiągając na tym odcinku wartość 47,28 m poniżej powierzchni terenu. Różnica poziomów między peronami stacji Paulista i Consolação (linia 2 Verde) wynosi 14 m, a łączący stacje podziemny tunel wyposażony jest m.in. w ruchomy chodnik.

Przebieg linii przez najbardziej zurbanizowaną część miasta narzucił wybór metod zastosowanych do konstrukcji tuneli oraz stacji. Szczególną uwagę poświęcono minimalizacji obszarów wywłaszczanych, w celu ograniczenia kosztów społecznych oraz finansowych. Główny tunel linii o długości 12,8 km został w całości wykonany za pomocą dwóch metod:

- odcinek od terminala Vila Sônia do stacji Faria Lima – podobnie jak większość tuneli pomocniczych (np. połączenia stacji Paulista i Consolação) – za pomocą metody NATM (ang. *New Austrian Tunneling Method*)
- odcinek od stacji Faria Lima do stacji Luz – za pomocą metody TBM (ang. *Tunnel Boring Machine*).

Przy budowie stacji stosowano – w zależności od warunków miejscowych – dwie różne metody: odkrywkową (ang. *cut-and-cover*) oraz NATM. W trakcie budowy wszystkich stacji w maksymalnym stopniu wykorzystano wstępne szyby konstrukcyjne, niezbędne do wykonywania dalszych prac. Jeżeli szyby te powstawały obok peronów, wykorzystano je do wydrążenia całej stacji poprzez tunel łączący. W sytuacjach, gdy były zlokalizowane dokładnie nad peronami, stacje drążono bezpośrednio z tych szybów. Po zakończeniu drążenia szyby wstępne zostały wykorzystane do połączenia peronów z powierzchnią – w ich przestrzeni zlokalizowano windy, schody ruchome itp. Przykład takiej realizacji przedstawiono na rycinie 5. Pierwszym etapem pracy było wykonanie trzech szybów o średnicy 19 m każdy. Z powstałej przestrzeni metodą NATM wydrążono tunel stacyjny, do którego od strony południowej dowierciła się tarcza TBM. Tarcza ta następnie przejechała na drugi koniec tunelu stacyjnego, po czym wykonała kolejne 500 m tunelu, aż do szybu końcowego, w którym została zdemontowana.



Ryc. 5. Plan stacji Luz na tle zdjęcia satelitarnego okolicy jej szybów wstępnych

Ciekawym przykładem wykorzystania przestrzeni miejskiej jest stacja República, położona na skrzyżowaniu Avenida Ipiranga oraz Avenida São Luiz. Lokalizacja obiektu na obszarze placu miejskiego pozwoliła na wykorzystanie metody otwartego wykopu, który jednak zminimalizowano, aby w jak najmniejszym stopniu naruszyć zieleń miejską. Wykorzystując fakt prowadzenia prac przy powstającej stacji, postanowiono także zreplikować przepływ pieszych z poziomu ulic. W tym celu wykonano po jednym wejściu w każdym narożniku skrzyżowania. Dzięki temu węzeł po ukończeniu będzie stanowił nie tylko przestrzeń stacyjną, ale równocześnie przejście podziemne dla pieszych, w którym funkcjonować będzie dodatkowo podziemna galeria handlowa.

Na linii kursują sześciowagonowe składy produkcji Hyundai Rotem (ryc. 6). Widoczna na fotografii nieprzeźroczysta część czoła składu stanowi drzwi awaryjne, umożliwiające (po otwarciu) opuszczenie pojazdu np. w wypadku awarii w tunelu. Dostęp do tych wyjść jest ułatwiony dzięki konstrukcji pojazdu, który wewnątrz nie ma drzwi między kolejnymi wagonami. Dzięki temu pojazd stanowi właściwie wagon wieloczlony o wspólnej na całej długości przestrzeni pasażerskiej.



Ryc. 6. Tabor linii 4 Amarela na stacji postojowej Vila Sônia [3]

Jak już wspomniano, ruch składów na linii prowadzony jest bez udziału maszynistów. Sterowanie zapewnia komputerowy system Siemens Trainguard MT CBTC. W celu ochrony podróżnych krawędzie peronowe na stacjach zostały na całej długości zabezpieczone za pomocą przezroczystych ścian z drzwiami otwierającymi się automatycznie po zatrzymaniu pociągu (ryc. 7). Wiele osób zwiedzających linię nie zdaje sobie początkowo sprawy z faktu, że w pociągu nie ma maszynisty. Przekonuje o tym dopiero spacer do czoła pociągu, w którym znajduje się jedynie wyjście bezpieczeństwa i dwa okna. Jazda składem pozostawia niezatarte wspomnienia. Ogromne wrażenie robi zarówno widok tunelu przez okna w czole składu, jak i obraz wnętrza wagonów podczas jazdy. Przy niezapełnionym składzie można – stojąc na jego końcu – obserwować zachowanie pojazdu podczas wpisywania się w krzywizny poziome i pionowe toru.

Perspektywy rozwoju transportu szynowego w São Paulo

System transportu szynowego miasta São Paulo jest zdecydowanie niewystarczający do zaspokojenia ciągle rosnących potrzeb przewozowych. Dlatego w najbliższym czasie planowana jest jego intensywna rozbudowa, obejmująca także linie metra. Zakres prac prowadzonych obecnie przedstawiono w tabeli 4, natomiast w tabeli 5 zawarto plany rozbudowy w okresie do 2017 r.

Tab. 4. Aktualnie rozbudowywane linie metra w São Paulo [3, 5]

Linia	Stacje końcowe	Długość [km]	Stacje [szt.]
Linia 2-A Verde	Vila Prudente Cidade Tiradentes	23,8	17
Linia 5 Lilás	Largo Treze Chácara Klabin	11,4	11

Tab. 5. Linie metra w São Paulo będące w fazie projektowania [3, 5]

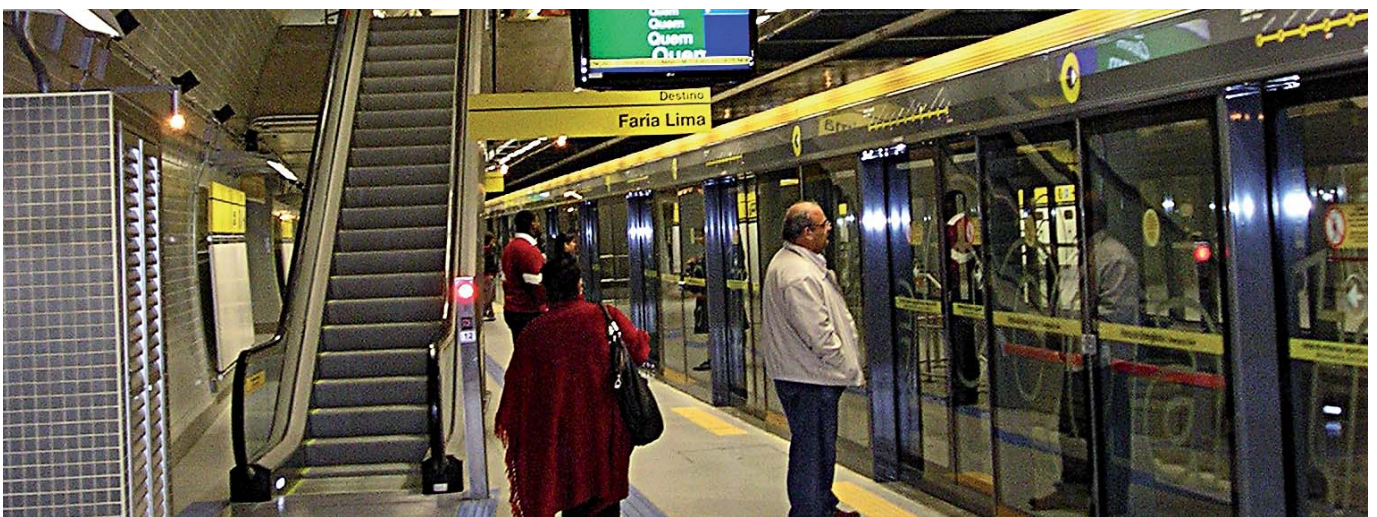
Linia	Stacje końcowe	Długość[km]	Stacje [szt.]
Linia 6 Laranja	Brasília São Joaquim	14,0	17
Linia 15 Branca	Vila Prudente Tiquatira	10,0	9
Linia 16 Prata	Cachoeirinha Lapa	9,0	10
Linia 17 Ouro	Morumbi São Judas/Jabaquara	21,5	20

Spośród projektowanych tras największe znaczenie ma linia 14 Ônix, łącząca centrum z międzynarodowym portem lotniczym Guarulhos, oraz linia 17 Ouro, zapewniająca łączność z krajowym lotniskiem Congonhas oraz z północną częścią pozbawionej dotychczas transportu szynowego dzielnicy Zona Sul.

Zarządzane przez Metrô nowo budowane i projektowane linie niekoniecznie będą miały tradycyjny, podziemny przebieg. W tak urozmaiconym wysokościowo terenie, jakim charakteryzuje się metropolia São Paulo, przebieg niwelety linii względem płaszczyzny terenu trzeba traktować bardzo elastycznie, dostosowując go do lokalnej sytuacji oraz możliwości finansowych. Te ostatnio często nie są małe, gdyż władze oraz inwestorzy mają ambicje wykorzystywania nowych inwestycji do tworzenia kolejnych „wizytówek” miasta. Tak należy traktować fakt, że przedłużenie istniejącej linii 2 Verde (tzw. Linia 2-A Verde) oraz nowo budowane linie 16 Prata i 17 Ouro mają być wykonane jako linie nadziemne jednoszynowe [3, 5].

Literatura

1. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas das Populações Residentes, em 10 de Julho de 2008. Strona internetowa ftp://ftp.ibge.gov.br, dostęp: 14 IX 2010.
2. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução No. 05, de 10 de Outubro de 2002, Área Territorial: UF – São Paulo – SP – 35. Strona internetowa ftp://geofp.ibge.gov.br, dostęp: 14 IX 2010.
3. Materiały uzyskane bezpośrednio przez autora od inż. Jana Nowakowskiego, projektanta linii 4 i 5. São Paulo, 2010.
4. Strona internetowa http://en.wikipedia.org/wiki/São_Paulo_Metro, dostęp: 14 IX 2010.
5. Strona internetowa http://www.saopaulo.sp.gov.br, dostęp: 14 IX 2010.



Ryc. 7. Ściana zabezpieczająca krawędź peronu na stacji Paulista