

Ensaios de carga das pontes sobre os rios Curoca e Bentiaba, em Angola

Luís Oliveira Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa

Júlio Fonseca

Laboratório de Engenharia de Angola, Departamento de Estruturas e Materiais, Luanda

João Rosário

Armando Rito Engenharia SA, Lisboa

Pedro Cabral

Armando Rito Engenharia SA, Lisboa

RESUMO: Os ensaios das pontes sobre os rios Curoca e Bentiaba, na província do Namibe, em Angola, foram realizados por equipas dos Laboratórios de Engenharia de Angola (LEA) e de Portugal (LNEC) com o objetivo de avaliar o seu comportamento estrutural e de esclarecer algumas dúvidas suscitadas durante a construção. Neste trabalho descrevem-se os ensaios realizados e de que forma a sua realização permitiu verificar o desempenho das obras e a sua aptidão para entrada em serviço.

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios de carga das pontes sobre os rios Curoca e Bentiaba, na província do Namibe, em Angola, foram motivados por algumas dúvidas relativamente ao seu comportamento estrutural que surgiram no decurso dos trabalhos de construção. Com a sua realização procurou-se esclarecer essas dúvidas, para além de proceder a uma avaliação geral do comportamento estrutural das duas pontes quando sujeitas a significativas sobrecargas rodoviárias.

Pretende-se com o presente trabalho divulgar a forma como o recurso aos ensaios de carga permitiu esclarecer as referidas dúvidas e clarificar a operacionalidade das pontes. Para este efeito, após uma breve apresentação das duas obras de arte, descrevem-se os ensaios realizados, destacando-se os aspectos específicos associados a cada obra e apresentam-se alguns resultados mais relevantes.

2 DESCRIÇÃO DAS OBRAS DE ARTE

A ponte sobre o rio Curoca situa-se a cerca de 60 km a sul da cidade do Namibe no troço da EN100 que liga esta cidade a Tômbua. É uma obra de betão armado pré-esforçado com uma extensão total de 800 m, que se divide em cinco módulos contínuos de 160 m, separados entre si por juntas de dilatação, constituídos por oito tramos com 20 m de vão. Na Figura 1 apresenta-se uma vista de jusante desta obra de arte, obtida a partir da proximidade do encontro sul.



Figura 1. Vista geral da ponte sobre o rio Curoca.

A ponte sobre o rio Bentiaba, situada a cerca de 100 km a norte da cidade do Namibe, está integrada no troço da EN100 que liga a capital da província a Lucira. Trata-se de uma obra de arte com um comprimento total de 220 m constituída por onze tramos com 20 m de vão, agrupados em dois módulos, um com cerca de 100 m e outro com os 120 m remanescentes (Figura 2).



Figura 2. Vista geral da ponte sobre o rio Bentiaba.

Ambas as pontes possuem uma plataforma de 11,00 m de largura, contendo uma faixa de rodagem com 7,00 m, com uma via de circulação para cada sentido e, em ambas as extremidades, 0,50 m de berma e 1,50 m de passeio.

A solução estrutural das duas obras de arte é, também, idêntica, possuindo tabuleiros com uma secção transversal constituída por cinco vigas pré-fabricadas, com um afastamento entre eixos de 2,25 m, ligadas entre si por painéis de laje pré-fabricados com $2,10 \times 1,60 \text{ m}^2$ solidarizados por bandas betonadas *in situ* e, nas secções de apoio, por carlingas igualmente betonadas *in situ*. Os apoios intermédios são materializados por pórticos transversais, constituídos por dois pilares ligados superiormente por uma

travessa, onde estão instalados os aparelhos de apoio do tabuleiro, e inferiormente pelo maciço de encabeçamento de quatro estacas.

3 ENSAIOS REALIZADOS

3.1 *Aspetos gerais*

Os ensaios estáticos realizados em ambas as obras consistiram na utilização de um máximo de quatro camiões carregados, perfazendo uma carga total de 1639 kN, dispostos em diversas posições ao longo do tabuleiro, de forma a induzir esforços significativos na estrutura, mas evitando níveis excessivos que pudessem provocar danos precoces nas estruturas, designadamente fendilhação.

A resposta estrutural foi avaliada através da medição de deslocamentos verticais e de rotações. A medição dos deslocamentos verticais foi efetuada através de catorze defletómetros potenciométricos (Figura 3), que permitem a medição de deslocamentos com uma precisão de 0,2 mm. Foram também utilizados, pontualmente e de forma redundante, alguns comparadores digitais (Figura 4). A utilização destes equipamentos nos diversos tramos ensaiados foi possível pelo facto de ambos os rios estarem secos quando os ensaios foram realizados.

As rotações foram medidas em várias secções através de clinómetros tipo gravidade biaxiais. Após cada carregamento foram também registados os valores residuais.

A simulação do comportamento estrutural da ponte nas condições dos ensaios foi realizada pela empresa Armando Rito Engenharia, projetista de ambas as pontes.



Figura 3. Defletómetro potenciométrico



Figura 4. Comparador digital

3.2 *Ensaio da Ponte sobre o rio Curoca*

3.2.1 *Procedimentos de ensaio*

Os ensaios de carga desta ponte tiveram como objetivo específico o esclarecimento de algumas dúvidas que surgiram no decurso da construção desta obra de arte relativamente ao comportamento da ligação entre as vigas longitudinais pré-fabricadas e as carlingas betonadas *in situ* do módulo norte da ponte, compreendido entre o pilar P32 e o encontro E2.

De forma a satisfazer este propósito, os ensaios realizados incidiram sobre todos os tramos compreendidos entre o pilar P32 e o encontro E2. Foram também ensaiados os tramos situados entre os pilares P3 e P11, bem como entre os pilares P19 e P24. Procurou-se assim ter uma amostra significativa do comportamento da estrutura, para além de se obter um comportamento de referência, que permitisse a aferição do desempenho do módulo entre o pilar P32 e o encontro E2.

Foram realizados seis ensaios, tendo-se utilizado dois procedimentos distintos: um mais detalhado, envolvendo quatro grupos de três tramos, nomeadamente os tramos entre o pilar P32 e o encontro E2; outro mais geral, utilizado no ensaio de dois conjuntos de cinco tramos. As diferenças foram, fundamentalmente, no número e disposição dos equipamentos utilizados.

Nos ensaios detalhados os deslocamentos verticais foram medidos nas secções de meio vão das vigas dos três tramos ensaiados, bem como nas duas secções de apoio intermédio, concretamente nas extremidades dos pórticos transversais.

A medição das rotações assumiu nestes ensaios um carácter decisivo na caracterização do comportamento da ligação entre as vigas e as carlingas. Para este efeito, em cada ensaio foi escolhida uma secção de apoio intermédio na qual duas vigas interiores (vigas 2 e 4) foram instrumentadas com um clinómetro numa secção da viga próxima do apoio, em ambos os lados da carlinga, e um outro clinómetro na própria carlinga, tal como se pode observar na Figura 5, permitindo, desta forma, verificar a existência de uma ligação rígida. A medição de rotações em algumas das secções de quarto de vão, onde previsivelmente ocorriam as maiores variações desta grandeza, permitiu complementar a caracterização do comportamento estrutural.



Figura 5. Clinómetros elétricos na carlinga e nas vigas interiores 2 e 4

O procedimento mais geral visou abarcar um maior número de tramos através da medição dos deslocamentos verticais nas secções de meio vão de apenas duas vigas interiores, vigas 2 e 4, ou seja nas vigas que ficam centradas sob as duas vias de circulação rodoviária. Pretendia-se assim despistar uma eventual anomalia de funcionamento, que, a acontecer, suscitaria uma instrumentação mais pormenorizada. Para além disso, foram medidas rotações em duas secções de quarto de vão, de forma a complementar a informação recolhida.

No decurso dos ensaios foi medida a temperatura ambiente através de termómetros do tipo PT100, colocados sob o tabuleiro, de forma a controlar os efeitos decorrentes de eventuais variações de temperatura.

A aquisição das leituras dos diversos transdutores foi realizada através de um *logger Datataker DT80G*, associado a dois módulos de expansão de canais CEM 20.

Os carregamentos realizados visaram induzir importantes momentos fletores nas secções de meio vão e de apoio dos tramos ensaiados: para a indução de momentos fletores positivos foram utilizados dois camiões, cujos eixos traseiros estavam posicionados sobre a secção de meio vão do tramo carregado, tal como está ilustrado na Figura 6a; a maximização dos momentos negativos sobre as secções de apoio intermédio foi conseguida através de dois pares de camiões dispostos nas secções de meio vão de dois tramos consecutivos, tal como se ilustra na Figura 6b.



Figura 6. Casos de carga da ponte sobre o rio Curoca: carregamento dos tramos

Realizaram-se também carregamentos visando a indução de um forte esforço axial nos pilares. Para esse feito, dispuseram-se os quatro camiões em duas linhas, de tal forma que as suas traseiras se situavam sobre o eixo do pilar carregado, como se pode observar na Figura 7a. Foram ainda realizados carregamentos excêntricos, durante os quais dois camiões foram posicionados numa das vias, de tal forma que as suas traseiras ficassem sobre as secções de meio vão destes tramos (Figura 7b). No total foram realizados 77 casos de carga.

Por fim realizaram-se ensaios com uma carga rolante constituída por um par de camiões. Durante estas passagens foi realizada em medição em contínuo das grandezas observadas, com uma frequência de aquisição de 0,5 Hz, tendo-se registado também o posicionamento dos camiões em todos os pontos notáveis do percurso, isto é, nas secções de apoio e de meio-vão, interpolando-se a sua posição nos instantes intermédios.



Figura 7. Ponte sobre o rio Curoca: carregamento dos pilares e carregamentos excêntricos

3.2.2 Resultados obtidos

Os ensaios realizados permitiram a obtenção de um elevado volume de dados. Com efeito, no decurso dos 77 casos de carga, foram medidos os deslocamentos verticais em 73 pontos (distribuídos por 30 secções) e as rotações em 28 pontos. Neste contexto, optou-se por apresentar apenas os resultados mais significativos para o esclarecimento das dúvidas suscitadas, concretamente as rotações medidas sobre os apoios intermédios, resultantes da instrumentação concebida para caracterizar o comportamento das ligações desses nós.

Na Figura 8 apresenta-se o registo das rotações longitudinais medidas pelos clinómetros instalados na segunda viga de montante, bem como na carlinga sobre o pilar P33, quando dois camiões circulavam, de forma muito lenta, ao longo do tabuleiro, no sentido sul-norte, juntamente com os valores medidos quando os mesmos camiões estavam estacionados nas secções de meio vão dos três tramos considerados. De igual forma, na Figura 9 estão representados os valores medidos nas mesmas secções mas na 4ª viga, simétrica da anterior. Os clinómetros CL10 e CL13, cujos valores estão representados nestas figuras, estão instalados no tramo P32-P33, os sensores CL11 e CL14 na carlinga e os restantes no tramo P33-P34.

θ (" sex.)

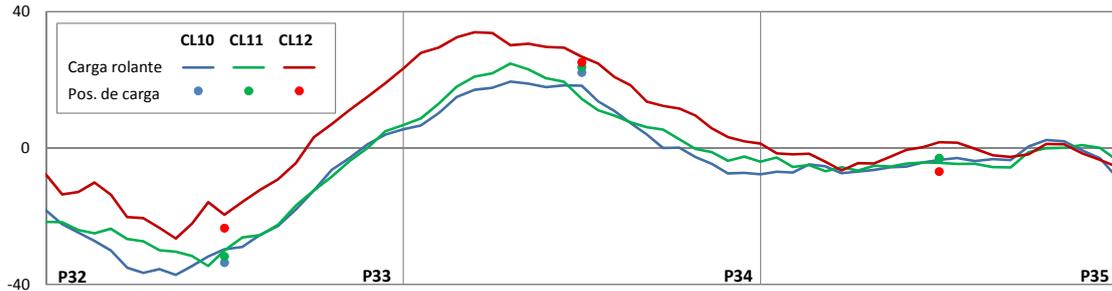


Figura 8. Linha de influência das rotações sobre o apoio no pilar P33 (alinhamento da 2ª viga)

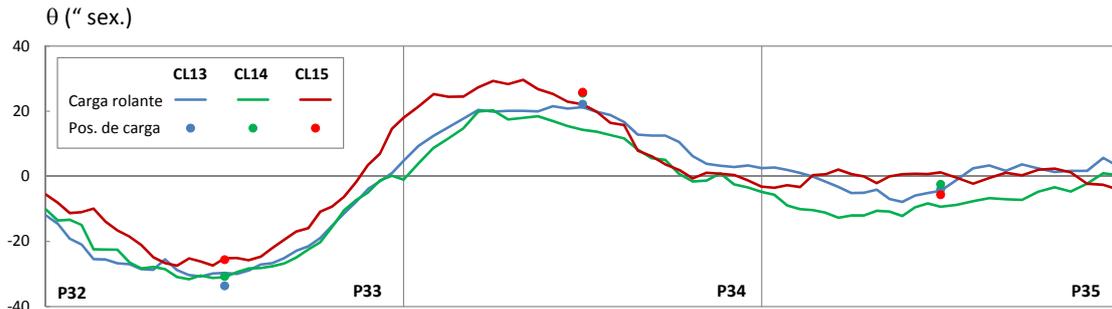


Figura 9. Linha de influência das rotações sobre o apoio no pilar P33 (alinhamento da 4ª viga)

A análise destas linhas de influência, semelhantes às obtidas nos restantes apoios ensaiados, permite verificar, desde logo, uma razoável correlação entre os deslocamentos decorrentes da carga rolante e os medidos durante os carregamentos com os camiões parados. Contudo, a verificação mais relevante prende-se com a semelhança da evolução das diversas linhas de influência entre si, que associada à continuidade que apresentam quando os camiões transitam entre os vários tramos da ponte, dão uma indicação clara da continuidade estrutural, isto é, do encastramento das vigas na carlinga, que, recorda-se, era um dos aspetos específicos que se pretendia esclarecer com a realização dos ensaios.

3.3 Ensaio da Ponte sobre o rio Bentiaba

3.3.1 Procedimentos de ensaio

A realização do ensaio de carga da Ponte sobre o rio Bentiaba teve como objetivo genérico a avaliação experimental do seu comportamento estrutural quando sujeito a significativas sobrecargas rodoviárias e como objetivo específico o esclarecimento de algumas dúvidas relativas aos resultados dos ensaios de integridade realizados em algumas estacas.

Foram realizados ensaios estáticos que incidiram sobre todos os tramos da ponte. Atendendo à sua elevada extensão, optou-se por dividir o ensaio em quatro partes, incidindo cada ensaio sobre três tramos da ponte.

Foram utilizados os camiões e o equipamento referidos anteriormente. Em termos genéricos o procedimento de ensaio foi idêntico ao utilizado na ponte sobre o rio Curoca, com a realização de casos de carga visando maximizar o esforço axial nos pilares, os momentos fletores nas secções de meio vão e de apoio, para além da aplicação de cargas excêntricas e do recurso a uma carga rolante. As principais diferenças entre os ensaios das duas pontes prenderam-se com a disposição dos sensores, apesar de também nesta obra se terem medido deslocamentos verticais e rotações em diversas secções do tabuleiro.

As diferenças centraram-se fundamentalmente na instrumentação efetuada na proximidade dos apoios intermédios. Com efeito, a existência de estacas de fundação cujos ensaios de integridade originaram resultados inconclusivos motivou uma instrumentação destas secções de apoio que incidiu sobre a respetiva travessa (e não sobre a carlinga como no caso anterior) tendo-se instalado em cada travessa um clinómetro e dois defletómetros, um em cada extremidade, de forma a detetar um eventual assentamento sob a ação das cargas de ensaio.

Para caracterizar o comportamento do tabuleiro sob a ação das cargas de ensaio, instalou-se um clinómetro na proximidade do apoio de uma viga interior de cada tramo e um outro na secção de quarto de vão da mesma viga, onde, previsivelmente, ocorrem as maiores rotações. Foram também instalados três defletómetros na secção de meio vão dos tramos ensaiados, tendo-se privilegiado a instrumentação das três vigas centrais, por se encontrarem sob a faixa de rodagem, ao contrário das vigas extremas que se encontram sob os passeios.

Na Figura 10 apresentam-se duas vistas de tramos instrumentados: na imagem da esquerda estão assinalados os clinómetros instalados na travessa e nas secções de apoio e de quarto de vão da 4ª viga; na imagem da direita apresenta-se uma vista de uma secção de meio-vão com três defletómetros ligados às três vigas centrais, estando ainda assinalado o clinómetro instalado na travessa. Nesta imagem as setas azuis indicam a localização em que foram instalados os defletómetros nas travessas.



Figura 10. Ponte sobre o rio Bentiaba: instrumentação com clinómetros e defletómetros

Relativamente aos carregamentos, para além dos descritos na obra anterior, foram também aplicadas cargas excêntricas sobre os apoios, de forma a suscitar eventuais assentamentos diferenciais.



Figura 11. Ponte sobre o rio Bentiaba: casos de carga

3.3.2 Resultados obtidos

O conjunto dos 74 casos de carga realizados, durante os quais foram medidos deslocamentos verticais em 49 pontos e rotações em 28 pontos, proporcionou um volume de informação considerável.

Dos resultados obtidos relevam-se os valores muito reduzidos medidos nas travessas dos pórticos de apoio intermédio (deslocamentos máximos de 0,1 mm), que indiciam um adequado funcionamento das fundações sob as elevadas cargas aplicadas.

A apreciação positiva do comportamento global da estrutura decorre da boa recuperação verificada após a retirada das cargas de ensaio, da correlação existente entre os valores medidos e estimados numericamente, da continuidade estrutural evidenciada pelo tabuleiro e da semelhança entre os valores medidos nos casos de carga idênticos realizados em diferentes tramos da estrutura.

Para ilustrar os resultados obtidos apresenta-se na Figura 12 o registo das rotações longitudinais medidas pelos clinómetros instalados numa das vigas interiores (4^o viga) nas secções junto aos apoios nos pórticos P8 (CL21), P9 (CL23) e P10 (CL26), quando dois camiões circulavam de sul para norte, de forma muito lenta, ao longo do tabuleiro. Incluem-se, também, nesta figura os valores medidos quando os mesmos camiões estavam estacionados nas secções de meio vão dos três tramos em causa.

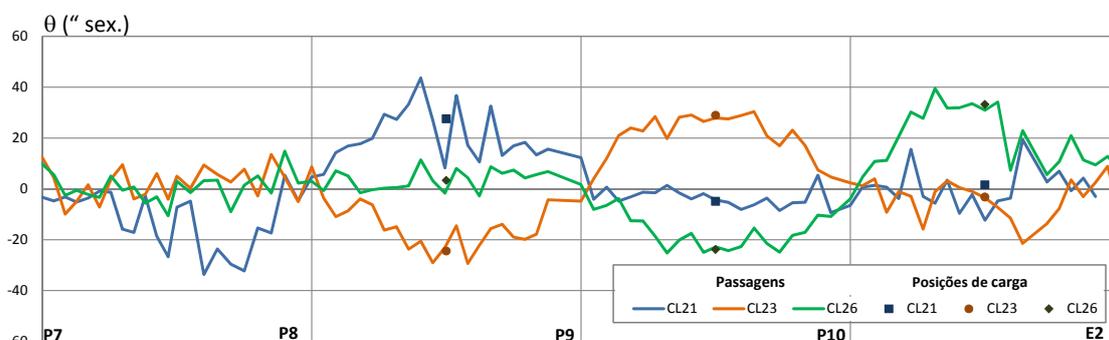


Figura 12. Ponte sobre o rio Bentiaba: linhas de influência das rotações nos apoios em P8 a P10

De forma análoga, a Figura 13 é constituída pelas rotações medidas nas mesmas circunstâncias pelos clinómetros CL24 e CL27, instalados nas secções de quarto de vão dos tramos compreendidos entre os pilares P9 e P10 (CL24), bem como no tramo extremo P10-E2 (CL27).

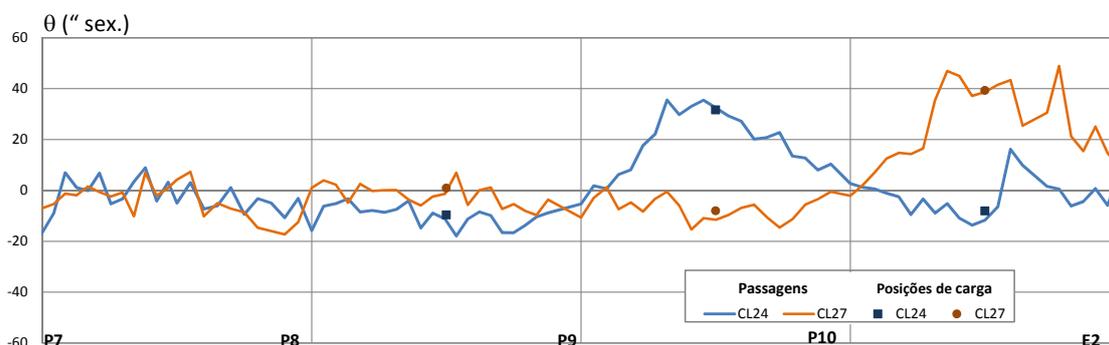


Figura 13. Ponte sobre o rio Bentiaba: linhas de influência de rotações em secções de 1/4 de vão

Por fim, apresentam-se na Figura 14 as rotações medidas durante a passagem lenta dos dois veículos pelo clinómetro CL28, instalado na segunda viga de jusante, próximo da secção de apoio no encontro E2.

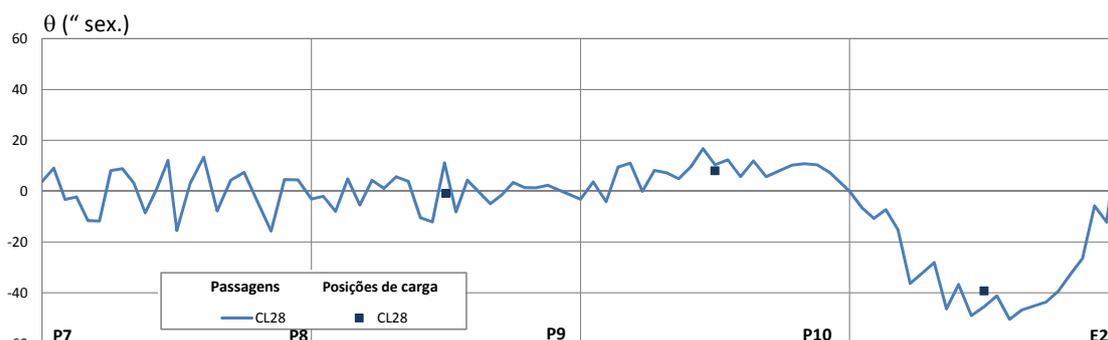


Figura 14. Ponte sobre o rio Bentiaba: linhas de influência de rotações no apoio em E2

4 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados nas pontes sobre os rios Curoca e Bentiaba, na província do Namibe, em Angola, permitiram verificar a funcionalidade das duas estruturas e a sua aptidão para a entrada em serviço. Para esta conclusão foi decisiva a boa recuperação ocorrida após a retirada das cargas de ensaio, a correlação existente entre os valores medidos e estimados, bem como a continuidade estrutural evidenciada pelas medições realizadas no tabuleiro. Um outro indicador da maior relevância foi a semelhança entre os valores medidos nos casos de carga idênticos realizados em diferentes tramos da estrutura.

As dúvidas existentes relativamente a aspetos específicos do funcionamento das obras de arte motivaram a concepção de alguns procedimentos particulares, que se refletiram na definição dos casos de carga e, principalmente, na disposição da instrumentação utilizada. Estes procedimentos revelaram-se adequados, na medida em que os ensaios realizados foram conclusivos no esclarecimento das dúvidas existentes, apesar das dificuldades associadas à pequena amplitude da resposta estrutural.

Os resultados obtidos no decurso dos ensaios permitiram a caracterização do comportamento das estruturas sem danos, que poderá ser utilizada na definição dos seus planos de manutenção e conservação.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INEA a possibilidade de apresentar este trabalho, bem como às empresas Ceddex e Carmon o apoio prestado na realização dos ensaios.

6 REFERÊNCIAS

- Rito, Armando; Cabral, Pedro, 2011. *Nova ponte sobre o rio Bentiaba*. Projeto de execução. Lisboa: Armando Rito Engenharia.
- Rito, Armando; Cabral, Pedro, 2011a. *Nova ponte sobre o rio Curoca*. Projeto de execução. Lisboa: Armando Rito Engenharia.
- SATCC, 1998. *Code of Practice for the Design of Road Bridges and Culverts*. Southern Africa Transport and Communications Commission.