

Pesquisas mostram os avanços para o dimensionamento e o controle do concreto projetado para túneis

FÁBIO LUÍS PEDROSO – EDITOR*

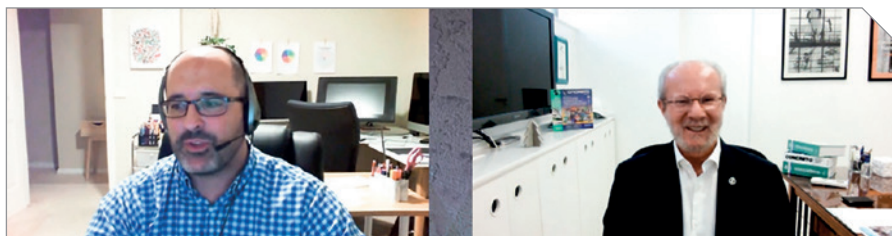
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5848-8710>

A construção mundial de túneis representa hoje cerca de 10% da construção civil em geral, crescendo a uma taxa de aproximadamente 7% ao ano, em contrapartida ao crescimento de 4% ao ano da construção. Embora a China seja atualmente o país que mais constrói obras subterrâneas, a Índia tem o dobro da taxa de crescimento da China. Os dados são de um levantamento feito pela ITA, associação internacional de túneis, em 2016.

Em termos construtivos, são 5.200 quilômetros de túneis construídos por ano no mundo. Mas, infelizmente, o Brasil não tem acompanhado esta tendência mundial.

Esses dados e o comentário sobre o Brasil foram trazidos por Dr. Tarcísio Barreto Celestino, professor da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e engenheiro da Themag Engenharia, na introdução de sua palestra magna no segundo dia do 62CBC2020.

Segundo Dr. David Oliveira, também palestrante do 62CBC2020, na Austrália



Prof. David Oliveira assistido pelo mediador, Prof. Paulo Helene, em momento de sua palestra no 62º CBC

e na Europa, é uma prática corriqueira a substituição completa de armaduras por fibras no concreto projetado para túneis. Em 2010, o *fib Mode Code*, documento normativo que serve de referência para as normas técnicas nacionais dos países europeus, consolidou esta prática especificando as condições requeridas para que o reforço com fibras substitua parcial ou integralmente o reforço convencional em túneis. “Esta substituição pode ocorrer desde que sejam satisfeitas certas condições que relacionam as resistências à tração na flexão de peças de concreto com fibras com aberturas de fissuras específicas nessas peças submetido ao ensaio de viga”, apontou o Eng. David Oliveira, professor da Universidade de Sidney e engenheiro-chefe

da Jacobs Engineering Group, em sua palestra magna.

No Brasil, a substituição das armaduras convencionais, em especial telas metálicas, por fibras é uma prática introduzida no país na década de 1990, “graças também aos estudos e pesquisas conduzidas na Escola Politécnica da USP, através do grupo do Prof. Paulo Helene, que inclusive formou especialistas na área, tais como: Prof. Luiz Roberto Prudêncio, Prof. Antonio Figueiredo e Dr. Hugo Armelin, entre outros”, afirmou o eng. Tarcísio.

As vantagens do uso do concreto projetado reforçado com fibras para túneis, sem uso de armaduras, são numerosas. Existe o ganho de produtividade por prescindir do tempo e dos

* fabio@ibracon.org.br



Por que a preferência por fibras?

Efeitos de sombra e encapsulamento inadequado de armaduras



Tela apresentada pelo Prof. David Oliveira mostrando problemas construtivos associados à execução do concreto projetado com telas metálicas

profissionais para instalação das armaduras na frente de escavação. Com a remoção da etapa de instalação das telas metálicas, ganha-se tempo no ciclo de avanço do túnel, o que faz com que o cronograma e o custo da obra sejam reduzidos. Há o aumento da segurança do trabalho pela redução do trabalho em altura e pela redução da exposição de trabalhadores nas frentes de escavação, sem revestimento ou com revestimento provisório. Há menor volume de perdas durante a aplicação do concreto, uma vez que as telas metálicas proporcionam um anteparo irregular e que vibra, aumentando o volume de concreto refletido durante o jateamento do revestimento do túnel. Conseqüentemente, há também redução de defeitos na execução, como encapsulamento inadequado da armadura pelo concreto. Por fim, há a possibilidade de instalação de ancoragens para equipamentos e sistemas de ventilação e iluminação, sem o receio de se atingir a armadura.

ENSAIO DE VIGA

Segundo David Oliveira, o ensaio de viga, segundo a norma europeia EN 14651, consiste de uma viga de concreto reforçado com fibras, com dimensões específicas, biapoiada e com um entalhe

em seu centro, que recebe uma carga central na face oposta ao entalhe. Durante o ensaio mede-se as aberturas de fissuras no entalhe, que são correlacionadas com as respectivas cargas aplicadas. Assim, as aberturas de fissuras (CMOD, no inglês) de 0,5 mm (CMOD 1), 1,5 mm (CMOD 2), 2,5 mm (CMOD 3) e 3,5 mm (CMOD 4) são relacionadas com suas respectivas tensões à tração na flexão (FR1, FR2, FR3 e FR4). É justamente as razões entre essas tensões que são as condições estabelecidas no *fib Mode Code* para que se possa fazer a substituição do reforço convencional pelo reforço com fibras no concreto projetado, sem implicar risco para a segurança da obra, pois nessas condições a peça estrutural atende ao estado limite último exigido.

As amostras para o ensaio de viga são preparadas nas frentes de escavação pela projeção do concreto com fibras para produção de painéis retangulares, de onde são cortadas as vigas para os ensaios. “Este ensaio é usado corriqueiramente na Austrália e em vários outros países para o controle de qualidade do concreto projetado no que tange à resistência à tração na flexão”, informou David Oliveira.

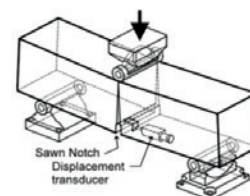
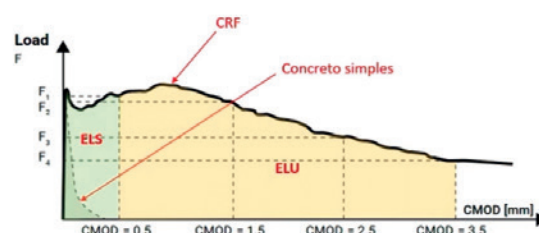
A ITA publicou recentemente diretrizes sobre a utilização do concreto projetado reforçado com fibras para o revestimento permanente de túneis que propõe o teste de flexão de três pontos em uma viga com entalhe (EN 14651), num movimento de aproximação com as concepções do *fib Mode Code* (2010), para obter parâmetros de projeto para túneis executados com concreto projetado reforçado com fibras. O Brasil acaba de publicar suas normas sobre o concreto projetado com fibras, sendo que a ABNTNBR 16940 já incorporou o ensaio de viga.

MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Para contribuir com a discussão sobre o desenvolvimento de um modelo do comportamento estrutural do concreto projetado para túneis, Tarcísio apresentou os resultados de uma

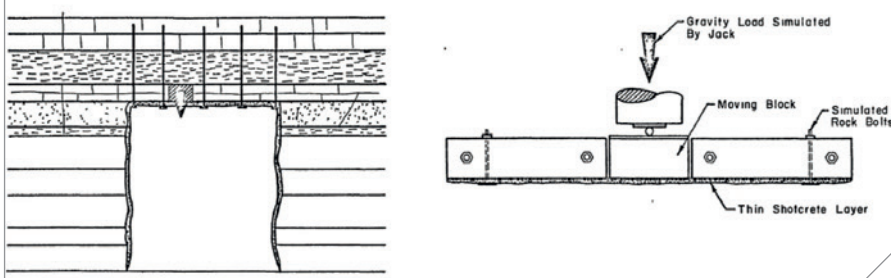
Comportamento estrutural típico

O ensaio de viga EN 14651 é o mais utilizado tendo como base seu uso em varias normas e guias de dimensionamento (ex. RILEM TC 162-TDF, FIB MC 2010, AS 5100 etc.). Nos fornece quatro resistências residuais à tração na flexão à quatro aberturas de fissuras diferentes:



Tela esquematizando o ensaio de viga de concreto reforçado com fibras

Ensaio da interação maciço – concreto projetado – teto plano (Fernandez, 1977)



Ensaio da interação entre o maciço e o concreto projetado para teto plano

pesquisa feita em 2013 por um de seus alunos de doutorado. No trabalho, buscou-se desenvolver um modelo numérico a partir de modelos estruturais de lajes e tubos de concreto, discretizados tanto para barras de armaduras e quanto para fibras de aço, levados a um comportamento fissuratório avançado.

Segundo ele, o modelo elasto-plástico frágil desenvolvido pode contribuir para obras de túneis mais econômicas, uma vez que reduz o superdimensionamento decorrente do modelo elástico-linear. O modelo elástico-linear é o mais simples de ser implementado na mecânica dos sólidos e foi o primeiro a ser adotado em muitas áreas da engenharia estrutural, por garantir a segurança. No entanto, com as pesquisas, ele tem sido substituído por modelos mais realistas.

Celestino abordou também a adesão do concreto projetado ao substrato do maciço da rocha, aspecto mecânico importante para o dimensionamento estrutural do revestimento de túneis. Relembrou um dos primeiros estudos sobre o tema, desenvolvido na Universidade de Illinois, nos Estados Unidos, em 1977. Nela, o pesquisador Gabriel Fernandez analisou uma fina camada de concreto projetado, com duas partes fixas no substrato e uma parte móvel na qual se aplicou o carregamento. E constatou que o modo mais usual de ruptura era a perda de adesão da parte móvel em relação às partes fixas e a consequente ruptura por flexão. “O ensaio mostrou por que o concreto projetado é tão amigável à construção de túneis: sua adesão natural ao substrato do túnel possibilita o desenvolvimento

de elevadas resistências à tração e flexão”, explicou Tarcísio.

“Tanto é verdade que, acima de 5 cm de espessura, não há ganhos significativos de resistência do concreto projetado”, emendou o conferencista.

O Prof. David Oliveira fez o seguinte questionamento ao final da exposição do Prof. Tarcísio Oliveira: “A adesão do concreto ao substrato, de fácil verificação durante a execução - no curto prazo, pode ser mantida no longo prazo, e assim, assumida na especificação do projeto estrutural?”.

A mediação do debate foi feita pelo diretor de eventos do IBRACON, Eng. Rafael Timerman.

“Acredito que sim! Como os mecanismos físico-químicos envolvidos no ganho de resistência do concreto ao longo do tempo são os mesmos dos relacionados à adesão, devemos contar com esta característica do concreto no longo prazo. Isto precisa ser melhor investigado com a instrumentação das obras e poderá implicar economia de recursos financeiros nos projetos de túneis”, respondeu Tarcísio Celestino.

FATORES INTERVENIENTES NO CONCRETO PROJETADO NAS PRIMEIRAS IDADES

O concreto começa a trabalhar para suportar o túnel escavado desde o momento em que é projetado. De lá até os 28 dias, quando suas propriedades mecânicas atingem tipicamente valores da ordem de 35 MPa de resistência à compressão e 25 GPa de módulo de elasticidade (rigidez), o concreto sofre uma deformação lenta muito pronunciada. Em razão deste comportamento, as propriedades mecânicas finais do concreto projetado não são apenas decorrentes do tempo

Loading System



Poço construído para programa experimental no qual se avaliou a influência dos carregamentos no revestimento de concreto projetado com fibras



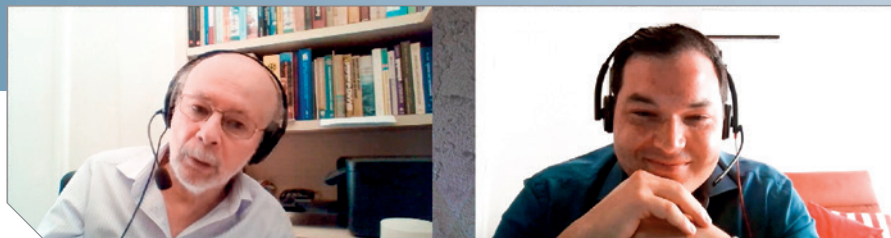
MÉTODOS TRADICIONAIS x ESCANEAMENTO TÉRMICO

Os métodos tradicionais de medida da resistência à compressão do revestimento do túnel (penetrômetro, *pull out* e testemunhos) são destrutivos ou semidestruativos, sendo caracterizados pelas medidas pontuais e localizadas, bem como por valores de ensaios que não representam os valores reais da estrutura de suporte.

No ensaio de viga, por exemplo, apresentado pelo Dr. David Oliveira, os resultados dos ensaios de viga apresentaram uma média de cerca de 3 MPa de resistência à tração na flexão para CMOD 4, para uma taxa de 40 kg de fibras por metro cúbico de concreto projetado. “Mas, em razão da dispersão desses resultados, com coeficientes de variação de 20% a 30%, o valor característico de FR 4 ficou bem abaixo do requerido por norma, de 2 MPa”, destacou Oliveira, para complementar: “Mudando o tipo de fibra metálica para uma de melhor desempenho, o FR 4 médio subiu para 3,8 Mpa e o FR 4 característico elevou-se para 2,6 MPa”.

“Este valor é considerado conforme pela norma australiana usada para projeto de túneis, porque as amostras produzidas em campo são tratadas como testemunhos, envolvendo uma série de incertezas do processo construtivo, aspecto reconhecido na norma australiana. Por isso, os construtores australianos aceitam valores de ensaio de vigas em torno de 87% dos valores de projeto como valores conformes”, ilustrou David Oliveira acerca da diferença entre os valores dos ensaios e os valores reais estimados para o revestimento dos túneis.

Ainda sobre esta diferença, David Oliveira argumentou que “o mesmo



Eng. Tarcísio Celestino responde à pergunta do mediador da sessão de debates, Eng. Rafael Timerman

(isto é, do desdobramento de reações químicas de hidratação do cimento), mas também dependentes do histórico de carregamentos nessas primeiras idades (ou seja, do desdobramento das condições mecânicas a que o material é submetido desde sua aplicação).

Num dos estudos experimentais, foi construído um poço de 2,5 m de diâmetro, instrumentado, revestido com concreto projetado com fibras, que recebeu carregamentos verticais e horizontais por meio de almofadas dispostas em valas abertas no perímetro de toda extensão e profundidade do poço, progressivamente enchidas com ar comprimido. “A instrumentação mostrou uma perda de água do concreto projetado para o solo poroso, provocando uma retração plástica da faixa do concreto próxima ao solo, resultado este não esperado!”, comentou Tarcísio e completou: “Por isso, o módulo de elasticidade desta seção de concreto em contato com o solo desenvolveu progressivamente valores mais baixos do que os valores da seção de concreto do poço em contato com o ar”.

Uma vez que foi observado que o solo seco pode retirar água do concreto e reduzir aderência e resistência, o presidente do IBRACON, Prof. Paulo Helene, ponderou se não seria o caso de umedecer o solo seco anteriormente à projeção do concreto para melhorar a aderência ao substrato. O Eng. Tarcísio Celestino abordou que “seria o ideal, mas por outro lado isto poderia diminuir o tempo de auto sustentação do maciço e, portanto, requer mais pesquisa”.

Perguntado pelo Dr. Paulo Fernando, Diretor da Concremat, sobre a exigência habitual no Brasil de que a resistência do concreto projetado em túneis suba 1 MPa por hora nas primeiras 10 h, o Prof. Tarcísio respondeu: “É exagerada! Não só a resistência característica aos 28 dias, mas também a resistência em pequenas idades deve também ser customizada para o tipo de maciço. O maciço arenoso requer uma progressão rápida da resistência do concreto, mas o maciço argiloso é capaz de se auto sustentar por até 8 h!”.

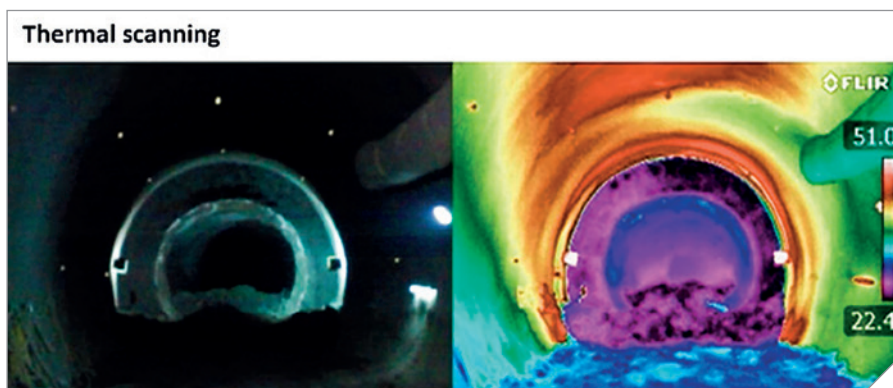
Comportamento estrutural típico

Prática atual do uso do Ensaio de Viga pela EN 14651



Amostras de ensaios em produção são cortadas de um único painel projetado no campo.

Preparação das amostras para o ensaio de viga pela projeção do concreto com fibras na frente de escavação do túnel



Tela apresenta o escaneamento térmico de túnel

concreto com as fibras de melhor desempenho apresentou, no Ensaio de Painéis Circulares Determinados (RDP), o FR 4 médio de 3,6 MPa e o valor característico de 2,9 MPa, devido ao fato dos resultados deste ensaio apresentarem menores coeficientes de variação (11% a 15%)”.

Em contrapartida, o monitoramento da resistência usando o imageamento térmico (SMUTI) parte da correlação entre a resistência do concreto e o grau de hidratação do cimento, que, por sua vez, correlaciona-se com a temperatura do concreto. Em decorrência dessas correlações, a imagem no espectro infravermelho das ondas eletromagnéticas da estrutura de um túnel, com a variação de cores indicando a variação de temperatura, são capazes de ser relacionadas com a resistência desse concreto no momento de captação.

Com esta nova tecnologia, tornou-se possível medir as resistências reais nas primeiras idades do concreto projetado na frente da escavação do túnel, aumentando-se, com isso, a segurança das equipes de trabalho.

Outra aplicação do escaneamento térmico é o melhor controle da espessura do concreto projetado na frente de escavação. Antes, este controle era

feito por meio de medidas pontuais, antes e após a aplicação do concreto, cuja diferença, descontada as estimativas de deformação do maciço rochoso, possibilitava estimar a espessura do revestimento. Hoje, com o escaneamento térmico, este controle é direto, completo e imediato.

FIBRAS METÁLICAS OU SINTÉTICAS

Fibras metálicas ou fibras sintéticas? O que determina a escolha por uma ou outra no concreto projetado com fibras?

Esta escolha é determinada pela fluência de uma fibra ou outra e pela própria fluência do concreto projetado com fibras.

A fluência do concreto reforçado com fibras pode ser medida por meio do ensaio de painéis circulares determinados (RDP). Esses painéis recebem uma carga de pico para fissurarem. Em seguida, o carregamento é reduzido até que o painel tenha uma determinada deformação, correlacionada a uma determinada abertura de fissura. Esse carregamento é mantido até a ruptura das fibras. O tempo decorrido até a ruptura da fibra é medido e está associado à fluência do CRF.

Os resultados do ensaio de painéis circulares apresentados por David Oliveira mostraram que o concreto reforçado com fibras macrossintéticas têm uma fluência muito superior a do concreto reforçado com fibras metálicas, tanto para uma abertura de fissura menor (em torno de 0,5 a 1 mm), com o elemento estrutural resistindo a tensões com valores próximos a cargas de serviço, quanto para uma abertura de fissura maior (por volta de 3 mm), com o elemento carregado por tensões próximas aos valores das cargas de limite último.

David apresentou também ensaios para medir a fluência das fibras metálicas e macrossintéticas. Uma viga foi carregada até atingir uma abertura determinada de fissura (de 0,25 mm a 1,5 mm, para os ensaios que avaliaram a fluência das fibras para cargas de serviço; e de 2,5 mm, para os ensaios que avaliaram a fluência das fibras para cargas de estado limite último). Em seguida, a viga foi carregada novamente com 50% a 60% da carga que gerou a fissura inicial, que foi mantida por longo tempo.

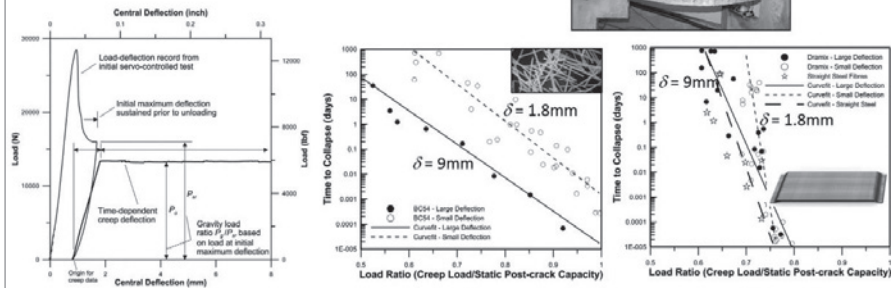
Nos trabalhos que apresentou em sua palestra, David apontou que “os coeficientes de fluência das macrofibras sintéticas variaram entre 1 e 4, enquanto os das fibras metálicas, entre 0,7 e 1, para as cargas de serviço”.

Ele ressaltou também que no estado limite último, as macrofibras sintéticas dos casos analisados mostraram um comportamento instável a partir dos 40 dias de carregamento, com algumas amostras se rompendo aos 100 dias. Já, para as fibras metálicas, “nenhuma das amostras com fibras metálicas tiveram suas fibras rompidas no ensaio”, informou David.



Fibras de aço versus macro-sintética

Ruptura lenta por fluência em elementos de CRF submetidos à flexão pós-fissuração:



Apresentação dos resultados de concreto reforçado com fibras de aço e macrossintéticas em ensaio de flexão pós-fissuração

Outra desvantagem das macro-fibras sintéticas foi a influência mais incisiva da temperatura na sua fluência. O Eng. David Oliveira apresentou um estudo no qual os valores de fluência das macrofibras sintéticas sobem exponencialmente a partir dos 30°C, enquanto os das fibras metálicas tem um ligeiro acréscimo.

“Além disso, a partir de temperaturas superiores a 50°C as fibras macrossintéticas começam a ter perda significativa de resistência com comportamento visco-elástico e derretem, isto é, apresentam comportamento líquido, com perda total da sua resistência à tração a partir de temperaturas acima de 160°C, enquanto as fibras metálicas começam a perder sua resistência à tração com temperaturas superiores a 300°C e comportamento mais líquido somente com temperaturas superiores a 1000°C”, complementou David.

Em contrapartida, Oliveira mostrou duas vantagens das macrofibras sintéticas. Elas não perdem ductilidade com o aumento da resistência à compressão do concreto com o tempo, ao contrário das fibras metálicas que, dependendo do ganho final de resistência ao longo do tempo, podem perder até 50% do seu valor inicial de ductilidade. E as fibras macrossintéticas não corroem. Segundo ele, a perda de seção de macrofibras sintéticas não pode ser atribuída ao ingresso de agentes agressivos no concreto.

Em síntese: as fibras de aço, devido ao seu elevado módulo de elasticidade, acabam se comportando melhor para atender às resistências residuais associadas a baixos níveis de fissuração, ou seja, atendem bem ao Estado Limite de Serviço; por sua vez, as macrofibras sintéticas, por serem mais dúcteis e resistentes à agentes agressivos do meio, tendem a apresentar bom comportamento para o Estado Limite Último.

O mediador do debate com David Oliveira, Prof. Paulo Helene, pediu para o palestrante comentar sobre dois pontos discutidos na palestra do Prof. Tarcísio Celestino: a perda de água do concreto projetado para o substrato e a perda de água da camada externa do revestimento para o ar forçado dentro do túnel, obtendo a seguinte resposta: “em razão da maioria dos túneis na Austrália ser feita em rochas, não se verifica o problema da perda de água na sua camada interna, mas que o problema da retração plástica por causa da ventilação forçada é comum também no país”.

OBRAS VIABILIZADAS COM CONCRETO PROJETADO

Seja concreto projetado com fibras metálicas ou macrofibras sintéticas, com substituição parcial ou total das armaduras, a tecnologia trouxe diversas vantagens para a construção de túneis. Em alguns projetos, ela se mos-

tra indispensável para a concretização.

Tarcísio Celestino apresentou alguns casos de obras que não se viabilizariam sem a tecnologia do concreto projetado.

Um deles foi a construção da casa de força da usina de Paulo Afonso IV. Com vão livre de 26 m, para comportar o rotor, “o projeto estrangeiro encomendado pela Eletronorte previa uma escavação de 32,6 m do maciço rochoso de classe 3, o que representava possibilidade de risco do colapso iminente”, pontuou. Já, o projeto brasileiro, que se viabilizou, apresentou uma escavação de 26 m, dividida em três fases, com atirantamento e uso de concreto projetado com 15 cm de espessura. “Eu não sei ainda hoje outro modo de se viabilizar o projeto que não fosse com concreto projetado”, comentou.

“Nossa engenharia é vanguardista no mundo?”, provocou o moderador Rafael Timerman, com respeito às obras apresentadas.

“Nossa engenharia é de primeiríssima qualidade! Quantos profissionais, como, por exemplo, o David Oliveira, e empresas brasileiras não fazem projetos e executam obras no exterior! Isto é um atestado de nossa capacidade técnica”, asseverou Tarcísio Celestino. ➤

SHOTCRETE SUPPORTED SHAFTS



Poço da Linha 4 do Metro de São Paulo, localizado na Rua da Consolação, viabilizado com concreto projetado