

TÚNEIS

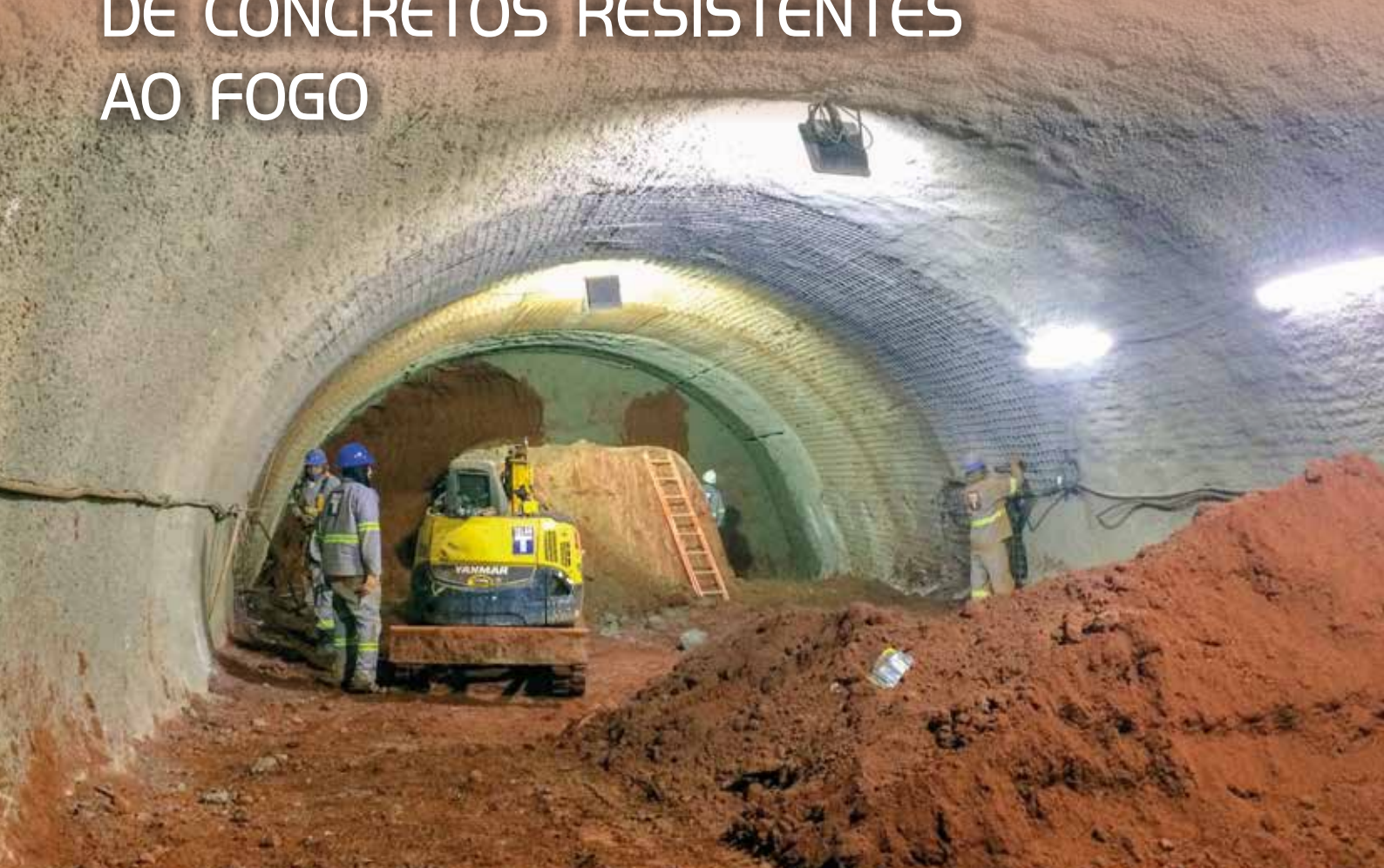
PRÁTICAS DE PROJETO E EXECUÇÃO DE TÚNEIS, MEDIDAS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS RESISTENTES AO FOGO



Ano XLVII
97

JAN-MAR
2020

ISSN 1809-7197
www.ibracon.org.br



ENTIDADES DA CADEIA

ESTUDO NACIONAL
DE CONCRETO DE
IDADES AVANÇADAS

MANTENEDOR

PROJETO STUTTGART 21:
INOVAÇÃO EM CONSTRUÇÃO
DE TÚNEIS

PERSONALIDADE ENTREVISTADA

TARCÍSIO CELESTINO: MAIS
INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS
E EQUIPES TREINADAS PARA
CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

EMPRESAS E ENTIDADES LÍDERES DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL ASSOCIADAS AO IBRACON

ADITIVOS



ADIÇÕES



RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL



ARMADURA



EQUIPAMENTOS



ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO



Escola Politécnica - USP



ESCRITÓRIOS DE PROJETOS



JUNTE-SE A ELAS

Associe-se ao IBRACON em defesa e valorização da Arquitetura e Engenharia do Brasil !

PRÉ-FABRICADOS



CONSTRUTORAS



CONTROLE TECNOLÓGICO



Falcão Bauer



FÔRMAS



CONCRETO



POLIMIX

CIMENTO



LafargeHolcim



Associação Brasileira de Cimento Portland



CIMENTO NACIONAL



InterCement



Votorantim Cimentos

GOVERNO





CRÉDITOS CAPA
TÚNEL DE INTERLIGAÇÃO DA TORRE MATA ATLÂNTICA COM O SETOR PARKING DA CIDADE MATARAZZO.

CRÉDITO DA IMAGEM:
MAFFEI ENGENHARIA

SEÇÕES

- 5 Editorial
- 6 Coluna Institucional
- 7 Converse com o IBRACON
- 8 Encontros e Notícias
- 10 Personalidade Entrevistada: Tarcísio Celestino
- 52 Entidades da Cadeia
- 78 Mantenedor
- 108 Acontece nas Regionais



REVISTA OFICIAL DO IBRACON

Revista de caráter científico, tecnológico e informativo para o setor produtivo da construção civil, para o ensino e para a pesquisa em concreto.

ISSN 1809-7197

Tiragem desta edição: 5.000 exemplares
Publicação trimestral distribuída gratuitamente aos associados

JORNALISTA RESPONSÁVEL

→ Fábio Luís Pedrosa - MTB 41.728
fabio@ibracon.org.br

PUBLICIDADE E PROMOÇÃO

→ Arlene Regnier de Lima Ferreira
arlene@ibracon.org.br

PROJETO GRÁFICO E DTP

→ Gill Pereira
gill@elemento-arte.com

ASSINATURA E ATENDIMENTO

office@ibracon.org.br

GRÁFICA

Duograph
Preço: R\$ 12,00

As ideias emitidas pelos entrevistados ou em artigos assinados são de responsabilidade de seus autores e não expressam, necessariamente, a opinião do Instituto.

© Copyright 2020 IBRACON

Todos os direitos de reprodução reservados. Esta revista e suas partes não podem ser reproduzidas nem copiadas, em nenhuma forma de impressão mecânica, eletrônica, ou qualquer outra, sem o consentimento por escrito dos autores e editores.

PRESIDENTE DO COMITÊ EDITORIAL

→ Ercio Thomaz

COMITÊ EDITORIAL – MEMBROS

- Alessandra Lorenzetti de Castro (ensino)
- Alio Kimura (informática no projeto estrutural)
- Arnaldo Forti Battagin (cimento e sustentabilidade)
- Bernardo Tutikian (tecnologia do concreto)
- Cláudio Vicente Mitidieri Filho (qualidade e desempenho)
- Eduardo Barros Millen (pré-moldados)
- Emilio Minoru Takagi (aditivos e adições)
- Evandro Duarte (concreto protendido)
- Fabiana Lopes Oliveira (arquitetura)
- Frederico Falconi (fundações)
- Guilherme Parsekian (alvenaria estrutural)
- Hugo Rodrigues (cimento e comunicação)
- Inês Laranjeira da Silva Battagin (normalização técnica)
- Íria Lícia Oliva Doniak (industrialização)
- Jorge Batouni Neto (sistemas construtivos)
- Maurício Linn Bianchi (sistemas construtivos)
- Osvaldo Cascudo Matos (durabilidade)
- Ricardo Leopoldo e Silva França (projeto de estruturas)
- Selmo Kuperman (barragens)

IBRACON

Av. Queiroz Filho, 1.700, sala 407/408, Torre D, Villa Lobos Offi ce Park 05319-000 – Vila Hamburguesa, São Paulo – SP
Tel. (11) 3735-0202



INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO

Fundado em 1972
Declarado de Utilidade Pública Estadual – Lei 2538 de 11/11/1980
Declarado de Utilidade Pública Federal – Decreto 86871 de 25/01/1982

DIRETOR PRESIDENTE
Paulo Helene

DIRETOR 1º VICE-PRESIDENTE
Julio Timerman

DIRETOR 2º VICE-PRESIDENTE
Enio José Pazini Figueiredo

DIRETOR 1º SECRETÁRIO
Cláudio Sbrighi Neto

DIRETOR 2º SECRETÁRIO
Carlos José Massucato

DIRETOR 1º TESOUREIRO
Julio Timerman

DIRETOR 2º TESOUREIRO
Hugo Armelin

DIRETORA DE MARKETING
Jéssika Pacheco

DIRETOR DE PUBLICAÇÕES
Guilherme Parsekian

DIRETOR DE EVENTOS
Rafael Timerman

DIRETOR TÉCNICO
José Tadeu Balbo

DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS
Cesar Henrique Daher

DIRETOR DE CURSOS
Leandro Moura Trautwein

DIRETORA DE ATIVIDADES ESTUDANTIS
Jéssica Andrade Dantas

DIRETOR DE CERTIFICAÇÃO DE PESSOAL
Adriano Damasio Soterio

DIRETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
Bernardo Tutikian

INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO

23 Segurança contra incêndio em túneis

OBRAS EMBLEMÁTICAS

35 Túnel de interligação da Torre Mata Atlântica com o setor Parking da Cidade Matarazzo



45 Túnel Paulo Autran

ESTRUTURAS EM DETALHES

61 Controle tecnológico de concreto projetado com fibras nos túneis da UHE Chaglla, no Peru



70 Concreto projetado para impermeabilização por cristalização de túneis

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

82 Avaliação da resistência ao fogo do concreto para revestimento de túneis

88 Incêndios em túneis construídos com concreto reforçado com fibras com função estrutural

95 Desenvolvimento de concreto geopolimérico projetado para proteção contra incêndio



101 Influência da projeção no processo de hidratação de misturas cimentícias contendo aceleradores



Concreto: ciência, tecnologia, desenvolvimento e qualidade de vida

Caro leitor,

Há 48 anos, nascia, em 1972, o Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, que, na ocasião, promoveu um evento no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, com o objetivo de discutir a boa engenharia de concreto contrabalançando os descaminhos da época: o acidente grave da Ponte Rio-Niterói, que ceifou a vida de engenheiros do próprio IPT; o colapso parcial do elevador Paulo de Frontin e o trágico desabamento do centro de convenções da Gameleira, em Belo Horizonte, para citar apenas os mais expressivos.

Era um período de grande progresso no país, muitas construções emblemáticas, obras habitacionais e de infraestrutura em profusão, mas ficou evidente a falta de engenheiros bem preparados. A pesquisa científica experimental nas universidades estava no início e havia necessidade de criar um espaço salutar de discussão técnica e científica.

Os visionários fundadores do IBRACON logo perceberam a importância de oferecer oportunidades aos pesquisadores e engenheiros de publicar e discutir em alto nível seus trabalhos, pesquisas e ideias. Hoje o congresso anual recebe, analisa, revisa e discute mais de 800 artigos provenientes do meio técnico e de cerca de 130 centros de pesquisa em concreto no país.

A pesquisa científica visa entender e explicar o comportamento dos materiais e das estruturas, visa questionar o conhecimento atual, duvidar das “verdades” tradicionais e propor novos e inéditos caminhos. A ciência aplicada gera tecnologias e, por meio da engenharia, buscam-se soluções para problemas do dia a dia, como a construção de qualidade e métodos construtivos balizados por limites toleráveis de falhas, consensuados socialmente. Como consequência, o desenvolvimento precisa não apenas de muitos “cientistas” questionando o existente e já conhecido, mas também dos “tecnologistas e engenheiros” que transformem esses questionamentos em processos e métodos exequíveis em favor da excelência, da qualidade e da economia. O Instituto tem cumprido com maestria esse papel fundamental de unir a cadeia produtiva do concreto com a academia, em uma sinergia positiva e interação profícua, em benefício do setor.

Se, por um lado, a atual conjuntura econômica desfavorável do país, com poucas construções e baixo investimento em infraestrutura, emprega poucos engenheiros; por outro, oferece a oportunidade para que se intensifiquem as pesquisas, os questionamentos e o aprendizado no setor, em busca de novas tecnologias que permitam à categoria se capacitar e responder bem às demandas, que certamente virão no futuro.

Em abril de 2019, o governo federal se manifestou sobre a importância da engenharia e, na ocasião, o Presidente declarou, corre-

tamente, a engenharia e a medicina como as áreas que deveriam receber maior atenção no financiamento de bolsas da Capes.

Soa contraditória a notícia veiculada pelos órgãos de imprensa desta semana mostrando que os cursos de pós-graduação mais atingidos por corte de bolsas em 2019 foram, justamente, a engenharia e a medicina, ao lado da educação.

Em todo o país, foram canceladas 7.590 bolsas para financiar pesquisas de pós-graduandos, num universo de 84.600 pesquisadores. Cursos de Mestrado e Doutorado em engenharia perderam 959 bolsas, o maior volume, seguidos pela educação, com 241 cortes, e medicina, com 232.

Essas medidas podem acarretar a redução de trabalhos científicos no Congresso Brasileiro do Concreto e certamente não contribuem para o desenvolvimento necessário do país. Não há progresso e melhoria da qualidade de vida sem engenharia. Cabe ao Instituto manter os seus nobres ideais e missão de criar, divulgar, capacitar e defender o conhecimento e o desenvolvimento do setor.

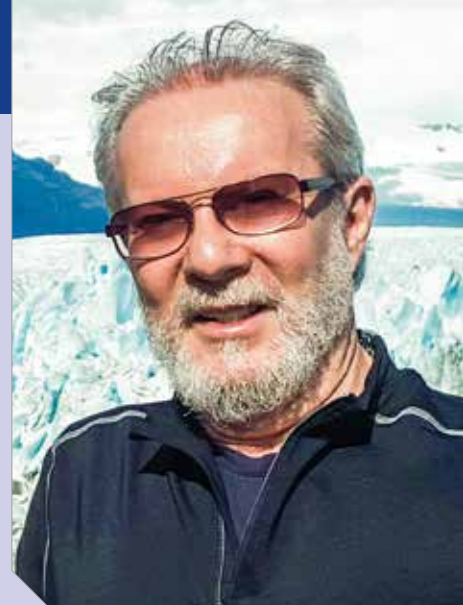
Tanto no início do Instituto quanto até hoje, o IBRACON tem viabilizado, com qualidade e prestígio, a divulgação da produção técnica e acadêmica de excelência, constituindo-se no maior fórum de conhecimento científico e tecnológico do país em engenharia de concreto.

Nos últimos anos tem recebido várias contribuições nacionais e até estrangeiras, de pesquisadores relevantes, dedicando esta edição da CONCRETO & Construções ao importante tema dos túneis, solução de engenharia que permite a transposição de cidades densamente povoadas, com menor intervenção local possível, favorecendo a mobilidade urbana nas grandes metrópoles. Cabe registrar que, nesta edição, rende-se também justa homenagem aos especialistas brasileiros, que reconhecidos internacionalmente, já foram alçados ao cargo de Presidentes da ITA (*International Tunneling Association*), demonstrando a alta capacitação brasileira no tema.

A nova Diretoria do IBRACON, recém-empossada, abraçou jovens voluntários dispostos a doar seu tempo, seu conhecimento, sua liderança e seu prestígio em prol da boa, sustentável e durável engenharia de concreto que todos almejamos.

Aproveite e venha também fazer parte desta Comunidade!

Junte-se ao maior grupo formador de opinião em concreto no país!



PROF. PAULO HELENE

DIRETOR PRESIDENTE | GESTÃO 2019-2021

Novidades do 62º Congresso Brasileiro do Concreto

Estamos nos preparando para o nosso grande evento anual, o Congresso Brasileiro do Concreto, este ano na sua 62ª edição, em Florianópolis. A organização de um evento com a previsão de mais de 1200 congressistas, diversas empresas expositoras, vários eventos internos e atrações únicas é um grande desafio para toda a atual diretoria do IBRACON e de parceiros nesta tarefa.

E o pilar central, com maior responsabilidade estrutural, é, sem dúvida, a parte científica do evento. É a oportunidade de grandes pesquisadores e empresas mostrarem seu trabalho e levarem as novidades para um fórum extremamente qualificado para discutir, concordar, discordar e chegar em inovações para o setor. Cada vez mais, são necessários trabalhos técnico-científicos que impacte a indústria da construção, que gerem valor para a sociedade, que tragam inovações para o nosso setor.

E o IBRACON cumpre seu papel, através do recebimento de artigos de todo país e exterior. Ano após ano, o Congresso Brasileiro do Concreto vem batendo recorde de publicação de artigos, e tenho certeza que este ano não será diferente! Recebemos 1867 resumos e, neste momento, estamos em processo de recebimento e avaliação científica dos artigos. Este número consolida o Congresso Brasileiro do Concreto como o maior evento técnico-científico da área da América Latina!

Montamos uma comissão científica com mais de 300 integrantes dos melhores profissionais do país, pois o desafio é grande: avaliar cerca de 900 artigos em 3 meses, de forma rigorosa, porém construtiva. São profissionais que doam suas horas para benefício de toda a cadeia do concreto, para dar visibilidade a nossas universidades, trazer conhecimento das empresas e atualizar os profissionais. Queremos produzir projetos e obras em concreto melhores, para impactar a vida das pessoas e ajudar o



desenvolvimento do país. E certamente estamos no caminho!

Este ano teremos uma grande novidade: os 50 melhores artigos serão selecionados para compor um caderno especial com ISSN específico e DOI individual para os trabalhos. Para quem não é da área acadêmica, o DOI é um número único, que faz com que a difusão de tal artigo seja mundial e com maior acesso por pesquisadores de todas as partes do globo. É um grande avanço científico.

Ainda, os melhores artigos serão selecionados para apresentação oral e por pôsteres, compondo as plenárias para discussão durante os

4 dias de evento, entre 1 e 4 de setembro. É uma grande oportunidade para os congressistas aprenderem algo novo, consolidarem informação já obtida, discordarem, concordarem, enfim, ajudar a elevar o nível técnico-científico de determinados trabalhos. Além disso, este ano terá a 3ª edição do concurso “O Artigo do Ano”, valorizando todas as regiões do país.

Por fim, agradeço aos mais de 4000 autores dos cerca de 900 artigos que receberemos, aos mais de 300 integrantes da comissão científica e aos cerca de 120 autores que comporão as mais de 20 seções científicas e seminários. Para mim, é uma grande honra coordenar este processo, junto com os colegas professores Roberto Christ, Fernanda Pacheco e Hinoel Zamis.

Venha participar do 62º Congresso Brasileiro do Concreto, venha com sede de saber, e como dizia a psicanalista Melanie Klein, “Quem come do fruto do conhecimento é sempre expulso de algum paraíso”. E como é bom ser expulso de alguns paraísos...

Até o 62º CBC, nos vemos lá!

PROF. BERNARDO TUTIKIAN
DIRETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
GESTÃO 2019-2021



ENVIE SUA PERGUNTA PARA O E-MAIL: fabio@ibracon.org.br

PERGUNTAS TÉCNICAS

QUAIS OS CONCRETOS E FIBRAS MAIS ADEQUADOS PARA EXECUÇÃO DE PISOS INDUSTRIAIS?

Essa é uma pergunta bastante ampla, mas vamos focar nos principais pontos para a definição do que é um concreto adequado para o piso industrial, que pode apresentar uma variada gama de aplicações desde, por exemplo, aviários a fábricas de aeronaves. O primeiro ponto a ser destacado é que eles diferem dos concretos estruturais em algumas características importantes, como teor de argamassa, ar incorporado, exsudação, retração, resistência à abrasão, resistência à tração na flexão, etc. Portanto, um concreto de f_{ck} de 30 MPa para aplicação em estruturas pode diferir substancialmente de um concreto de mesma resistência para aplicação em pisos industriais, sendo a não diferenciação um engano bastante comum praticado na fase orçamentária das obras. Independente da sua aplicação, o concreto para pisos industriais deve apresentar as seguintes características:

1. Teor de argamassa (relação entre as massas secas de cimento + agregado miúdo e cimento + agregados totais) entre 49% e 52%: essa é uma exigência ligada ao acabamento do pisos; caso esse teor seja menor que 49%, o acabamento superficial pode apresentar agregados graúdos muito próximos da superfície;



e se maior que 52%, pode levar à delaminação superficial;

2. Ar incorporado inferior a 3%: caso seja mais elevado, o risco da delaminação superficial aumenta consideravelmente;
3. Exsudação menor que 4%: para a aplicação de aspersões cimentícias, é importante que haja uma pequena exsudação para permitir a hidratação do cimento que as compõe; valores maiores poderão interferir na resistência à abrasão;
4. Retração por secagem inferior a 500 $\mu\text{m}/\text{m}$: para reduzir o empenamento da placa e permitir juntas com menores aberturas;
5. Resistências mecânicas: f_{ck} superior a 30 MPa, para aplicações mais comuns, ou superior quando as solicitações abrasivas forem mais exigentes; resistência à tração na flexão mínima usual é de 4,2 MPa, mas dependendo dos agregados graúdos, que interferem bastante nessa propriedade, aceitam-se valores menores.

Algumas aplicações podem exigir características distintas, como resistência aos sulfatos ou outros ataques químicos, que devem ser analisados caso a caso. Quanto às fibras, que podem ser micro-

fibras para controle da retração plástica, ou as estruturais – as macrofibras poliméricas e as de aço – empregadas para conferir tenacidade ao concreto. As macrofibras poliméricas podem ser encontradas em diversos modelos, marcas e tipos de polímeros, devem ser alcali-resistentes, para resistir ao meio básico do concreto. Já as fibras de aço mais comuns são as de ancoragem nas extremidades, podendo ser coladas – de mistura mais fácil no concreto – ou soltas. A função das fibras estruturais é permitir a formação de um material compósito, com matriz de ruptura frágil (concreto) e reforço dúctil; portanto, as fibras devem ser necessariamente dúcteis, fazendo com que o concreto reforçado com fibras seja dúctil, isto é, capaz de absorver energia, mesmo após o rompimento da matriz. A característica emprestada pelas fibras, a tenacidade, irá variar em função do tipo, fator de forma e volume empregado das fibras. Como regra geral, as macrofibras poliméricas fornecem menores tenacidades do que as de aço, mas o uso de uma ou de outra é uma questão de critério de projeto. O que temos observado na prática é que é possível obter pisos de excelentes desempenhos tanto com as macrofibras poliméricas, como as de aço, desde que o projeto leve em consideração as particularidades e limitação que elas podem apresentar.

PÚBLIO PENNA FIRME RODRIGUES – DIRETOR DA LPE ENGENHARIA E CONSULTORIA



Paulo Monteiro é eleito para a NAE

Prof. Paulo Monteiro, que recebeu o título de sócio-honorário do IBRACON em 2019, foi eleito para a National Academy of Engineering (NAE), seção da National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, cujos relatórios têm profundo impacto nas políticas de governo dos Estados Unidos.

Paulo Monteiro é professor titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Califórnia, em Berkeley, nos Estados Unidos, onde tem se dedicado aos estudos da microestrutura do concreto em escala nanométrica, ensaios especiais de tomografia, durabilidade do concreto e comportamento estrutural. O processo de nomeação de um novo membro da NAE se inicia em maio com uma investigação ampla de todas as áreas da engenharia, com a finalidade de

identificar profissionais que tiveram grande impacto teórico ou prático no campo. Em seguida, os Comitês da NAE selecionam os finalistas até o final do ano. Em janeiro, os membros da NAE votam nos finalistas, sendo os resultados anunciados em fevereiro.

“A eleição para a NAE é a maior honra profissional dada a um engenheiro nos Estados Unidos. É uma oportunidade única para participar de comitês compostos por talentos profissionais, para resolver problemas de grande relevância técnica e social”, declarou Paulo Monteiro sobre sua eleição.

A cerimônia de posse ocorrerá em 4 de outu-

bro, durante a reunião anual da NAE, em Washington.

Paulo Monteiro intenciona integrar projeto de estudo sobre materiais de construção mais sustentáveis. “Esses projetos podem influenciar as agências estaduais e federais a terem uma atitude mais pró-ativa”, justificou.



▶ Excelência em EDUCAÇÃO CONTINUADA – Programa MasterPEC “Master em Produção de Estruturas de Concreto” | Calendário de Cursos 2020

Curso	Instrutores	Data	Local	Inscrição	Patrocinador	Créditos
Curso Preparatório: Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto Segundo a ABNT NBR 16230:2013	Enio Pazini	23, 24 e 25 de abril	Salvador	IDD	IBRACON	28
Curso Preparatório: Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto Segundo a ABNT NBR 16230:2013	Enio Pazini	30 e 31 de julho, 1 de agosto	Brasília – Goiânia	IDD	IBRACON	28
Curso Preparatório: Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto Segundo a ABNT NBR 16230:2013	Enio Pazini	24, 25 e 26 de setembro	São Paulo	IDD	IBRACON	28
Patologia das Estruturas de Concreto – Mitos e Verdades	Paulo Helene	29 e 30 de maio	Belo Horizonte	IDD	IDD & PhD (Sócios Coletivos)	15
Esclarecendo Reparos de Reabilitações em Estruturas de Concreto	Jéssika Pacheco	31 de julho e 1 de agosto	Belo Horizonte	IDD	IDD & PhD (Sócios Coletivos)	15
Reforços de Estruturas de Concreto – Soluções Inovadoras	Douglas Couto	18 e 19 de setembro	Belo Horizonte	IDD	IDD & PhD (Sócios Coletivos)	15
Execução de Estruturas de Concreto – Engenhosidades e Soluções	Carlos Brites	20 e 21 de novembro	Belo Horizonte	IDD	IDD & PhD (Sócios Coletivos)	15
Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio	Carlos Brites	2 e 3 de outubro	Curitiba	IDD	IDD & PhD (Sócios Coletivos)	15
Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio	Carlos Brites	26 a 28 de outubro	São Paulo	IDD	IDD & PhD (Sócios Coletivos)	15



Instituto Brasileiro do Concreto


Organização técnico-científica nacional de defesa e valorização da engenharia civil

Fundado em 1972, seu objetivo é **promover e divulgar conhecimento sobre a tecnologia do concreto e de seus sistemas construtivos para a cadeia produtiva do concreto**, por meio de publicações técnicas, eventos técnico-científicos, cursos de atualização profissional, certificação de pessoal, reuniões técnicas e premiações.

Associe-se ao IBRACON! Mantenha-se atualizado!

- Receba gratuitamente as quatro edições anuais da revista **CONCRETO & Construções**
- Tenha descontos de até **50%** nas **publicações técnicas do IBRACON** e de até **20%** nas **publicações do American Concrete Institute (ACI)**
- Descontos nos eventos promovidos e apoiados pelo **IBRACON**, inclusive o **Congresso Brasileiro do Concreto**
- Oportunidade de participar de **Comitês Técnicos**, intercambiando conhecimentos e fazendo valer suas **opiniões técnicas**

Fique bem informado!

 www.ibracon.org.br

 facebook.com/ibraconOffice

 twitter.com/ibraconOffice

Tarcísio Barreto Celestino



Graduado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1972), com mestrado (1978) e doutorado (1981) em Engenharia Civil pela Universidade da Califórnia, Berkeley.

Atualmente é professor da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e gerente de engenharia civil da empresa Themag Engenharia, onde é responsável técnico por vários projetos geotécnicos de usinas hidrelétricas, metrô, rodovias, entre outras.

Foi Presidente da ITA – *International Tunnelling and Underground Space Association* de 2016 a 2019, ocupando atualmente posição no seu Conselho Executivo. Foi Vice-Presidente da ISRM – *International Society for Rock Mechanics*.

É consultor, entre outras agências de fomento, do Conselho de Pesquisa da Noruega. Entre outras atribuições profissionais, é membro da junta de consultores da Andra – Agência do Governo Francês para disposição de rejeitos nucleares, para o Projeto Cigéo de estocagem subterrânea de resíduos nucleares em Meuse/Haute-Marne.

Foi Professor convidado dos Programas de Mestrado em Obras Subterrâneas do *IHE-Delft*, Holanda e da *École Polytechnique Fédérale* de Lausanne, Suíça.

IBRACON – COMO VOCÊ EXPLICA SUA OPÇÃO PELO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL NA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP EM 1968?

T. B. C. – A escolha por engenharia civil na Escola Politécnica da USP (POLI) não foi tão direta. Na realidade,

eu sonhava em fazer engenharia mecânica no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), tendo passado no



seu vestibular. Naquela época, meus dois irmãos no ITA aconselharam-me a fazer a POLI. Na faculdade, encantei-me por engenharia elétrica, optando pelo curso. Mas, durante as férias de fim do primeiro ano, considerando minha vontade e a de meus pais de retornar ao Ceará após terminar o curso em São Paulo, achei que seria mais viável fazer engenharia civil. No início do segundo ano, por um processo não muito retilíneo, consegui fazer minha transferência para a engenharia civil. Acho que foi muito acertada.

IBRACON – POR QUE, LOGO APÓS SE FORMAR, EM 1972, VOCÊ FOI TRABALHAR NA THEMAG COMO ENGENHEIRO DA ÁREA DE GEOTECNIA?

T. B. C. – As razões para ter escolhido geotecnia dentro da engenharia civil foram muito fortes. Eu já disse

que gostaria de ter sido engenheiro mecânico. Sempre guardei este interesse pela mecânica. A mecânica dos solos e a mecânica das rochas, no fundo, trazem a marca desse sabor. Foi com muita satisfação que, no final no quarto ano, recebi um convite para fazer um estágio na Themag, uma grande empresa envolvida nos projetos de algumas das maiores hidrelétricas do país naquele tempo. Outro fato marcante é que fiz a disciplina de Mecânica dos Solos com Milton Vargas e a de Fundações e Obras de Terra com Victor Mello. O Victor Mello era um grande professor, mas tenho a impressão de que, para a nossa turma, para a qual ele deu aula pela primeira vez na Poli, ele se esmerou ainda mais. Ele foi brilhante. Tanto assim que vários colegas meus se tornaram alguns dos geotécnicos mais importantes de minha geração - eu me excluo disso!

IBRACON – QUAIS FORAM OS MAIORES DESAFIOS, COMO ENGENHEIRO GEOTÉCNICO, NOS PROJETOS EM QUE PARTICIPOU NA THEMAG?

T. B. C. – Os desafios foram muitos porque me formei na época em que o Brasil construía obras importantes de sua infraestrutura. Quando olho para trás, fico

surpreso de ter trabalhado, nos três primeiros anos de minha carreira, nos projetos das hidrelétricas de Ilha Solteira, Água Vermelha, Tucuruí, Porto Primavera, Paulo Afonso 4 e Itaipu, entre outras. Lembro-me de ter participado de reuniões com consultores, como Arthur Casagrande, Victor Mello, Manuel Rocha, entre outros, o que muito contribuiu para meu desenvolvimento profissional. Entre esses projetos, cito um que não era o mais grandioso (o mais grandioso era Itaipu), mas que marcou minha vida e minha carreira: o projeto de Paulo Afonso 4. Originalmente uma empresa estrangeira propôs um projeto de uma caverna subterrânea de 32 metros de vão de escavação para a casa de força, que seria escavada de uma só vez, sem suporte primário, com revestimento final construído com um arco de concreto fortemente armado de 1,8m de espessura. Ainda havia uma viga de ponte rolante. Esse projeto mostrou-se inviável e, na época, a Eletrobras interviu na Chesf (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), substituindo a empresa estrangeira pela Themag Engenharia. No projeto da Themag, o arco de concreto fortemente armado foi reduzido para um arco de concreto projetado de 15 cm, além dos tirantes, para sustentar um maciço fraturado de classe 3. Aquela obra me marcou em razão do conceito de engenharia por trás do projeto para sua viabilização.



Eng. Tarcísio Celestino palestrando no 2018 Chinese Congress on Tunnels

“

ESSA OBRA [PAULO AFONSO 4] DEU UM RUMO
NA MINHA CARREIRA A RESPEITO DE COMO
VIABILIZAR CERTAS OBRAS SUBTERRÂNEAS
COM O USO DO CONCRETO PROJETADO

”



NA PRIMEIRA METADE DA DÉCADA DE 1970, NÃO HAVIA, COMO HOJE, DISPONIBILIDADE DE SOFTWARES COMERCIAIS, MAS APENAS PROGRAMAS BÁSICOS A PARTIR DOS QUAIS ERAM DESENVOLVIDOS MODELOS NUMÉRICOS PARA ATENDER ÀS SOLICITAÇÕES DOS CONSULTORES



O cronograma foi adiantado e a obra foi inaugurada antes do previsto, com economia de concreto e de escavação. Essa obra deu um rumo na minha carreira a respeito de como viabilizar certas obras subterrâneas com o uso do concreto projetado. Não tive participação nas grandes decisões de mudança do método construtivo de Paulo Afonso 4. Tiveram a ver com isso o Murillo Ruiz, Leonardo Redaelli, Giacomo Re e o consultor Don Deere. Mas, eu era um jovem engenheiro, responsável pelos modelos matemáticos, que me encantei com a solução. Um projeto no qual tive responsabilidade foi a construção do primeiro túnel em NATM (*New Austrian Tunnelling Method*) no final de 1981 para o Metrô de São Paulo. Era um projeto da Themag, com participação de uma empresa austríaca, a Geoconsult. O projeto previa que a argila orgânica seria tratada com rebaixamento do nível d'água, com eletrosmose², que funcionou nos primeiros 15 metros. Em razão da argila conter muitas lentes de areia, com a drenagem, o problema de estabilidade da frente foi revolido. Mas, a partir dos 15 metros, a eletrosmose não funcionou e a argila de baixa resistência causou

a instabilidade da frente. Não chegou a haver uma ruptura do tipo *day-light collapse*³, mas houve recalques que danificaram as residências sobre o túnel. Havia voltado recentemente da Universidade da Califórnia, nos Estados Unidos, quando o problema aconteceu, uma situação bem desagradável para o Metrô de São Paulo. Fui me envolvendo na obra, tornando-me o responsável pelo projeto de sua continuação. Com tratamento adequado do solo, o problema da instabilidade da frente foi resolvido e um segundo túnel do projeto foi concluído, com sucesso e economia. Este pequeno túnel com grande densidade de problemas e soluções contou com uma equipe maravilhosa e competente, não só na parte de geotecnia, mas também na parte de tecnologia do concreto, como o Eng. Selmo Kuperman, tendo sido um grande desafio e um marco na minha vida profissional. Foi uma época muito rica! Havia, na época, uma postura muito aberta do Metro de São Paulo para inovações e para participação da engenharia.

IBRACON – QUAIS E COMO OS VELHOS “PAPAS” DA GEOTECNICA, DA THEMAG, HIDROSERVICE, POLI, IPT ETC., MARCARAM SUA CARREIRA?

T. B. C. – Já disse como foram importantes os professores Milton Vargas e Victor Mello na minha escolha por geotecnia. Meu contato com eles continuou durante minha vida profissional, pois o Prof. Milton Vargas era um dos donos e diretores da Themag e o Prof. Victor Mello foi consultor em várias obras projetadas pela empresa. Além deles, duas pessoas com quem trabalhei na Themag foram os responsáveis por eu ter enveredado para a área da mecânica das rochas: o Murillo Ruiz e o Giacomo Re. Infelizmente, na POLI em minha graduação eu nunca ouvi falar de mecânica das rochas. Hoje, sei que a POLI resolveu essa deficiência, pois já fui convidado para dar algumas aulas lá em parte de um curso regular. Na Escola de Engenharia de São Carlos, onde dou aulas, há no curso de graduação a disciplina de mecânica das rochas. Devo citar também o consultor Manuel Rocha que também me influenciou muito a estudar mecânica das rochas. Paulo Sérgio Diniz Custódio me ensinou e desenvolveu meu gosto pelos métodos numéricos. Na primeira metade da década de 1970, não havia, como hoje, disponibilidade de softwares comerciais, mas apenas

¹ O NOME NATM TINHA COMO OBJETIVO DISTINGUI-LO DA ANTIGA ABORDAGEM DE ENCAPSULAMENTO AUSTRIACA. A DIFERENÇA FUNDAMENTAL ENTRE ESSE NOVO MÉTODO DE TUNELAMENTO, EM OPOSIÇÃO AOS MÉTODOS ANTERIORES, DERIVA DAS VANTAGENS ECONÔMICAS DISPONIBILIZADAS AO SE TIRAR VANTAGEM DA RESISTÊNCIA INERENTE DISPONÍVEL NO MACIÇO CIRCUNDANTE PARA ESTABILIZAR O TÚNEL (WIKIPÉDIA);

² ELETROSMOSE: MÉTODO DE ACELERAR A PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS PELO ACOPLAMENTO DE UMA CORRENTE ELÉTRICA;

³ COLAPSO QUE RESULTA QUE A LUZ DO SOL CHEGA AO TÚNEL.





Túnel duplo do Metrô de São Paulo, primeiro construído pelo método NATM para transporte metropolitano no estado

programas básicos, como o SAP⁴ da Universidade da Califórnia, a partir dos quais eram desenvolvidos modelos numéricos para atender às solicitações feitas pelos consultores.

Essas pessoas foram essenciais para o rumo que minha carreira tomou.

IBRACON – VOCÊ FEZ SEU DOUTORADO NA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA, EM BERKELEY, NOS ANOS 1980. POR QUE A ESCOLHA DE UMA UNIVERSIDADE ESTRANGEIRA? QUAIS DIFERENÇAS HAVIA ENTRE O ENSINO E PESQUISA NAS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS E NORTE-AMERICANAS?

T. B. C. – A escolha pela Universidade da Califórnia em Berkeley foi simples. Como mencionei, na Themag desenvolvíamos softwares de

elementos finitos para atender às necessidades por análises não lineares, elemento-junta, análise evolutiva, etc. Nada disso existia como software comercial, mas era desenvolvido com estudos. Lia na época o *Journal of the Geotechnical Division of ASCE*, notando que a maioria de seus artigos vinha de Berkeley.

Professores como Goodman, Duncan,

Seed, Mitchell, Clough, Wilson eram de lá. Queria ser aluno desses professores e fui para Berkeley. Tive uma bolsa da FAPESP, que viabilizou minha ida.

Com relação às diferenças entre as universidades brasileiras e norte-americanas, meu aprendizado na graduação na POLI foi de primeira linha, porque não tive dificuldade em acompanhar as aulas em Berkeley. Quanto à pesquisa, a diferença era grande. Até aquele momento ninguém havia ainda obtido o mestrado na Poli. A pós-graduação no Brasil estava engatinhando. Já, o departamento de engenharia civil em Berkeley, além de consolidado, era na época o número um nos Estados

Unidos, numa universidade entre as cinco melhores do mundo, com o maior número de professores com prêmios Nobel do país.

IBRACON – POR QUE DECIDIU DAR AULAS DE GEOTECNIA E MECÂNICA DAS ROCHAS NA GRADUAÇÃO, E PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS, NA PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, A PARTIR DE 1989?

T. B. C. – Tinha uma carta de intenção da POLI, assinada por seu então diretor, Prof. Martins, para minha contratação caso obtivesse o doutorado na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Era interessante economicamente para a POLI contratar uma pessoa com título de doutorado no assunto de seu interesse, como mecânica das rochas. Por essa razão, tive a bolsa da FAPESP. Quando voltei, o departamento da POLI pediu para eu aguardar a vaga. Nesse meio tempo, a Escola de Engenharia de São Carlos me chamou, em 1985, para vaga de período integral. Não aceitei, porque tinha interesse em continuar na Themag, participando de projetos multidisciplinares de desenvolvimento, como o de softwares, com equipes de geotécnicos, projetistas de estruturas, tecnologistas de concreto. Não era um trabalho rotineiro e achei que não valeria a pena trocá-lo por um trabalho de período integral. Em 1989,

⁴ STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM: UM DOS PRIMEIROS CÓDIGOS GERAIS DE ELEMENTOS FINITOS DESENVOLVIDO PELO PROF. E.L. WILSON, UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA, BERKELEY

“

ACHEI O CONVITE [DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS] IRRECUSÁVEL, EM RAZÃO DA PRENSA SERVOCONTROLADA PARA MECÂNICA DAS ROCHAS SER ÚNICA NO BRASIL NA ÉPOCA

”

“

COSTUMO DIZER, NAS MINHAS AULAS NA GRADUAÇÃO, QUE A ROCHA ERA TRATADA EM OUTRAS DISCIPLINAS COMO UMA HACHURA, ‘INDESLOCÁVEL’, IMPERMEÁVEL, INDEFORMÁVEL. NO ENTANTO, NA REALIDADE, A ROCHA É TUDO MENOS ISSO

”

a Escola de Engenharia de São Carlos recebeu aporte financeiro do Plano de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico para melhorar o seu laboratório de mecânica de rochas e comprou uma prensa servocontrolada. A vaga do Prof. Alfredo Bjornberg, recém-aposentado, foi transformada em tempo parcial. Achei o convite irrecusável, em razão da prensa servocontrolada para mecânica das rochas ser única no Brasil na época. Abriram um concurso para aquela vaga e fui aprovado. Mesmo em Berkeley não havia uma prensa dessas no laboratório de rochas. Por isso, com a possibilidade de fazer pesquisa em alto nível, apesar de eu ter que viajar três horas e meia de São Paulo até São Carlos, aceitei a vaga.

IBRACON – QUAL SUA AVALIAÇÃO DA ÊNFASE DADA À GEOTECNIA E À MECÂNICA DAS ROCHAS NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL? A METODOLOGIA DE ENSINO É ADEQUADA AOS ALUNOS ATUAIS?

T. B. C. – Em primeiro lugar, o ensino de graduação em mecânica dos solos no Brasil é, em geral, de boa qualidade. Em segundo lugar, são poucas as escolas que oferecem a disciplina de mecânica das rochas na graduação, o que é uma grande deficiência. Costumo dizer, nas minhas aulas na graduação, que a rocha era tratada em outras disciplinas como uma hachura, ‘indeslocável’, impermeável, indeformável. No entanto, na realidade, a rocha é

tudo menos isso! Quantos acidentes presenciamos porque a rocha rompeu, não o solo. Portanto, seu estudo é importantíssimo. Numa mesa-redonda na ABGE (Associação Brasileira de Geologia da Engenharia) disseram recentemente que o ensino de Geologia de Engenharia nos cursos de Geologia tem sido preterido. O Prof. Lázaro Zuquette escreveu um artigo sobre isso. Isto é uma deficiência. Eu diria que o sucesso de grande parte das obras no Brasil foi devido ao fluxo fácil de conversas entre geólogos e engenheiros. Gostaria de render uma homenagem aos meus alunos da Escola de Engenharia de São Carlos, que ganharam, neste ano, o *Rock Bowl*, concurso realizado no Congresso Internacional de Mecânica de Rochas, no qual competem alunos de pós-graduação de várias universidades estrangeiras. Foi proposto pelo Prof. Sérgio Fontoura, da PUC do Rio de Janeiro, que importou a ideia do *Petrol Bowl* da Sociedade de Engenheiros de Petróleo. Vencer o concurso mostra que as condições de contorno do nosso ensino não deixam a desejar a outras universidades de renome internacional.



Prof. Roy Carlson assinando a tese de doutorado do Eng. Tarcísio Celestino



Prensa servocontrolada do laboratório de mecânica de rochas da Escola de Engenharia de São Carlos



IBRACON – QUAIS OS ACIDENTES GEOTÉCNICOS E GEOLÓGICOS MAIS GRAVES QUE OCORRERAM EM NOSSO PAÍS NAS ÚLTIMAS DÉCADAS? EM CADA CASO, QUAIS AS LIÇÕES DEIXADAS?

T. B. C. – Os acidentes mais recentes e mais tristes são Brumadinho, Barragem de Fundão e Estação Pinheiros do Metrô de São Paulo. Nesse aspecto, o Brasil tem se destacado negativamente pelo número de acidentes de barragens. Apesar da capacidade demonstrada de se construir a maior hidrelétrica do mundo e tantas grandes barragens notáveis no cenário mundial, como é que acidentes com barragens vieram a ser tão frequentes? Aqui existe uma grande lição a ser aprendida. Quando as barragens eram construídas por entidades como a CESP (Companhia Energética de São Paulo) e Furnas, entre outras, dotadas de um corpo técnico que sabia os procedimentos de como contratar um projeto, como exigir qualidade na construção, como contratar uma empreiteira qualificada, esses acidentes não aconteciam com tanta frequência. Quando passaram a ser construídas por investidores, a qualidade do projeto e da execução passou a ser encarada com a mesma importância da qualidade dos insumos, graxa e cimento, ou seja, pelo preço. A prática do contrato do projeto por leilão é abominável e ilegal, de acordo com Sindicato das Empresas de Projeto de Engenharia e Arquitetura (Sinaenco), mas permanece nas

contratações do governo mesmo após tantas catástrofes.

É cedo para se falar de lições técnicas aprendidas com os acidentes com barragens de rejeito. Por outro lado, acertadamente já existe a decisão de não se construir mais barragens pelo método de alteamento por montante, o que é um aprendizado. No caso na Estação Pinheiros do Metrô de São Paulo, aprendemos a respeito da rapidez na interpretação de instrumentação e na implementação de medidas mitigadoras. Em 2006, o *International Tunnelling Insurance Group* (ITIG) e a Associação Internacional de Túneis (ITA) produziram um código de práticas a respeito de procedimentos a serem adotados especificamente em obras subterrâneas, porque o número de acidentes naquela época estava elevado no mundo e as empresas de seguro tendiam a não segurar serviços para obras subterrâneas. Isto traria prejuízo para esse grupo de empresas seguradoras, para a indústria de construção subterrânea e para a população. Assim, esse código é um bom exemplo de como solucionar problemas com obras subterrâneas, adotando-se práticas corretas em todas as etapas, desde o empreendedor da obra, passando pelo projetista, até o construtor, para diminuir o número de acidentes. A própria ITA produziu na época um artigo importante sobre análise de risco e os benefícios da adoção de

medidas mitigadoras na construção subterrânea. Fundamentalmente não se pode comprar engenharia como se compra graxa ou prego.

IBRACON – PORQUE COM TANTA TECNOLOGIA DISPONÍVEL, PRINCIPALMENTE NA PROSPECÇÃO DE SOLOS E NO MONITORAMENTO DE RECALQUES, AINDA EXISTE UMA INFINIDADE DE PEQUENOS ACIDENTES NA CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS URBANOS, INCOMODANDO PROPRIETÁRIOS E USUÁRIOS DE EDIFÍCIOS E CASAS (SÓ PARA EXEMPLIFICAR, NA CONSOLAÇÃO, UM EDIFÍCIO JUNTO À ESTAÇÃO SAIU DE PRUMO, TEVE DE SER EVACUADO E REFORÇADO)?

T. B. C. – Sou da opinião de que nós, engenheiros geotécnicos, investigamos muito pouco, em comparação, por exemplo, com os tecnologistas de concreto. O concreto é um material industrializado, especificado em seus ingredientes, com processo de produção sistematizado, com coeficientes de variação de resistência de cerca de 15%. Ainda assim, por norma, um certo volume, dependendo do tipo de obra, é retirado da betoneira para o ensaio de sua resistência final. Compare com um túnel urbano, onde entre 1 e 2 metros de sondagem são realizados, por metro de túnel, nos maciços rochosos, que, por serem naturais, têm variabilidade muito maior do que o concreto, com coeficientes de variação de resistência que podem chegar a 300%! Nós, engenheiros geotécnicos, nos contentamos em descrever uma amostra, nem



SOU DA OPINIÃO DE QUE NÓS, ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS, INVESTIGAMOS MUITO POUCO, EM COMPARAÇÃO, POR EXEMPLO, COM OS TECNOLÓGISTAS DE CONCRETO





**NÓS, ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS, NOS CONTENTAMOS EM
DESCREVER UMA AMOSTRA, NEM SEQUER ENSAIÁ-LA, QUE
REPRESENTA UM DÉCIMO DE MILÉSIMO DO VOLUME QUE OS
ENGENHEIROS DE CONCRETO EXIGEM QUE SEJA ENSAIADO**



sequer ensaiá-la, que representa um décimo de milésimo do volume que os engenheiros de concreto exigem que seja ensaiado. Os maciços de solos e os maciços de rocha têm uma variabilidade muito grande para um número tão pequeno de ensaios que fazemos, quando fazemos! Trabalhei muitos anos no Metrô de São Paulo sem ter sido feito um ensaio triaxial, contentando-me apenas com a descrição da sondagem SPT⁵. Nós, engenheiros geotécnicos, temos que ser muito mais exigentes! Precisamos investir mais em ensaios. Tantas publicações mostram a relação entre custo de investigação e custo da obra, e como isso se traduz em benefícios, em razão de uma previsibilidade melhor do custo de obra. Mas essa ideia é muito difícil de ser vendida aos empreendedores. Visitei o outro dia um túnel em outro país, com mais de 10 km de extensão, licitado com apenas cinco sondagens. Compram um TBM para escavar solo, mas deram de cara com rocha! Isso é inconcebível que ocorra no século XXI, mas é fato!

IBRACON – O QUE PODERIA SER FEITO EM RELAÇÃO ÀS EDIFICAÇÕES EXISTENTES NA PROXIMIDADE DO EIXO DA CONSTRUÇÃO DO TÚNEL, ANTES DE SUA CONSTRUÇÃO, PARA MINIMIZAR SEUS EFEITOS SOBRE ELAS?

T. B. C. – Na maioria das vezes os problemas não estão nas edificações, mas na imprevisibilidade

dos deslocamentos provocados pela escavação subterrânea. Como eu disse, precisamos de mais investigação para ter previsibilidades mais confiáveis. É claro que algumas situações exigem soluções a serem dadas às edificações antes das obras subterrâneas passarem, como reforços de fundação, reforços estruturais e medidas corretivas *a posteriori*, do tipo de injeção de compensação.

IBRACON – QUAL É A EXPLICAÇÃO PARA CERTOS TÚNEIS URBANOS, COMO OS DA AV. REBOUÇAS E DO VALE DO ANHANGABAÚ, ASSIM COMO OS TÚNEIS DA RODOVIA DOS IMIGRANTES, APRESENTAREM CONSTANTEMENTE, NA SECA E NA CHUVA, TANTAS INFILTRAÇÕES, QUE MOLHAM AS PISTAS E COLOCAM EM RISCO SEUS USUÁRIOS?

T. B. C. – São problemas que decorrem da falta de impermeabilização dos túneis. A companhia do Metrô de São Paulo passou a adotar técnicas específicas de impermeabilização de seus túneis e estações em meados da década passada. Outros tipos de obra ainda não adotam essas técnicas, mas deveriam adotar, como membranas de PVC entre concretos primário e secundário, ou uma solução do tipo de uma membrana *spray* entre concreto projetado primário e secundário. Em muitos outros países essas soluções de impermeabilização já são muito mais utilizadas, mas devem ser utilizados aqui também.

IBRACON – O QUE VOCÊ ACHA DO SISTEMA DE CONTRATAÇÃO DE OBRAS DE TÚNEL TIPO “PORTEIRA FECHADA”, RESPONSÁVEL, COINCIDENTEMENTE, POR GRANDES ACIDENTES NO BRASIL?

T. B. C. – Uma comissão estabelecida dos anos 70 nos Estados Unidos, capitaneada pela *National Science Foundation*, da qual participaram proprietários de obras, construtores, consultores e professores de obras subterrâneas descobriu que o que tinha de errado com elas era exatamente a porteira fechada. Meu professor de túneis na época, Tor Brekke, participou dessa comissão e trouxe muitas informações a esse respeito para seus alunos. Na década de 1990, quando se pensou em implantar a porteira fechada no Brasil, escrevi um artigo mostrando que, longe de ser a solução, essa forma de contratação traria mais problemas. Como trouxe! A Companhia do Metrô de São Paulo a adotou na Linha 4, mas não a adotou mais, porque o resultado não foi positivo. Fui tutor do grupo de trabalho de práticas contratuais da ITA, que produziu, junto com a FIDIC - Federação Internacional de Engenheiros Consultores, o ‘Livro Esmeralda’ sobre contratação de obras subterrâneas. No fundo, o sucesso de contrato de obras subterrâneas passa longe dos conceitos leoninos de um contrato de porteira fechada.

⁵ SONDADE A PERCUSSÃO COM ENSAIO DE PENETRAÇÃO (STANDARD PENETRATION TEST)



IBRACON – O QUE VOCÊ ACHA DO DESMONTE DAS EQUIPES TÉCNICAS DO ESTADO, COMPROMETENDO SEU PODER DE DISCERNIMENTO E CONTROLE, E REDUZINDO SUA CAPACIDADE DE CONTRATAR, GERIR E CONTROLAR OBRAS?

T. B. C. – É lamentável esse desmonte! Como fomos, durante tantas décadas, capazes de construir barragens entre as maiores do mundo, como Ilha Solteira e Tucuruí, Itaipu, mas, a partir dos anos 90, quando principalmente o setor privado passou a construir obras de barragens, o número de acidentes aumentou brutalmente? Porque as gestoras de empreendimentos, associadas aos investidores, não tinham equipes técnicas para gerenciar um projeto, para conduzi-lo para que tivesse qualidade. Isso é marcante! Tudo isso porque, como já disse, a mentalidade passou a ser contratar o projeto pelo menor preço. Hoje o projeto de engenharia custa 1% da obra, mas o ideal é que custasse de 3% a 5% do valor da obra. A engenharia do túnel São Gotardo, na Suíça, custou 10% do valor da obra, sendo 7% para projeto de engenharia e 3% para engenharia de gerenciamento durante a obra. Estive envolvido em projetos de obras no Brasil que custaram 0,5% do valor da obra. Isso porque, não havendo equipes técnicas para contratar projetos, prevalece, infelizmente, essa mentalidade do quanto mais barato, melhor. Ao contrário, em projeto, quanto mais barato, pior! Os exemplos

estão aí! É lamentável que equipes técnicas, como as da CESP, com a qual trabalhei no passado, de Furnas e de outras empresas não existam mais. Na ausência dessas equipes, o Estado contrata pelo menor preço, por leilão, um projeto de engenharia, o que é um absurdo! A Suíça jamais contrataria o túnel São Gotardo por leilão, porque os suíços têm juízo!

IBRACON – COMO GEOTÉCNICO E CIDADÃO COMO VOCÊ AVALIA OS ACIDENTES DE MARIANA E BRUMADINHO?

T. B. C. – Como cidadãos nos sentimos de luto pela morte de tanta gente e pelo dano ambiental tão sério. Como geotécnico me sinto frustrado. Assisti há 3 anos ao Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos, em Buenos Aires, no qual Luis Valenzuela, que apresentou a principal conferência do congresso e que trabalhou no Brasil nas décadas de 1970 e 1980, trouxe o caso do desmonte a fogo da ombreira da barragem de Guarapiranga, um aterro hidráulico construído no início do século XX. Foram feitos estudos de liquefação, que desaconselharam o uso de explosivos. Trouxe também o caso do aterro

hidráulico da barragem de Porto Primavera, cujo projeto se baseou na experiência dos russos, que continuaram fazendo por muito tempo esse tipo de obra, mesmo após o acidente por liquefação da barragem de Fort Peck, que fez o Ocidente abandonar esse método construtivo. Enfim, a palestra mostrou que o Brasil estava na crista da onda do estado da arte da construção de barragens nos anos 70. Fomos da crista da onda do estado da arte nos anos 70 para um acidente de tão grandes proporções, como Fundão e, infelizmente, alguns anos depois, Brumadinho. Eu não teria como comentar como geotécnico, pois não tenho conhecimento suficiente desses acidentes. Prefiro olhar para frente e mostrar o quanto precisamos investir em engenharia de boa qualidade, em procedimentos cada vez mais



Túnel São Gotardo, na Suíça, em sua fase de construção

“

HOJE O PROJETO DE ENGENHARIA CUSTA 1% DA OBRA, MAS O IDEAL É QUE CUSTASSE DE 3% A 5% DO VALOR DA OBRA

”



FOMOS DA CRISTA DA ONDA DO ESTADO DA ARTE NOS ANOS 70 PARA UM ACIDENTE DE TÃO GRANDES PROPORÇÕES, COMO FUNDÃO E, INFELIZMENTE, ALGUNS ANOS DEPOIS, BRUMADINHO



rigorosos de contratação. Isto porque a engenharia afeta a população e pode afetar de maneira drástica, como vimos nesses acidentes. Contratações não podem ser feitas com critérios inaceitáveis de preço mínimo. Não conheço os detalhes de contratação de Mariana e Fundão, mas me refiro a situações que conheço de concessionários contratarem obras de maneira totalmente inaceitável, mesmo após esses acidentes.

IBRACON – EM SUA EXTENSA EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL, COMO VOCÊ AVALIA A RELAÇÃO ENTRE GEOTÉCNICOS, PROJETISTAS DE ESTRUTURAS E TECNOLOGISTAS DE CONCRETO?

T. B. C. – Em muitas áreas da engenharia, o grande profissional é aquele que rompe fronteiras, que domina duas áreas e consegue trazer os *inputs* de uma para a outra. Exemplifico com o professor Péricles Brasiliense Fusco, exímio engenheiro estrutural, muito bom tecnologista de concreto. Lembro-me que, em suas aulas, ele conseguia tão bem juntar os dois assuntos. Quando pensamos em túneis, a fronteira entre o geotécnico e o tecnologista do concreto projetado não deveria existir. O ideal seria um profissional sozinho fazendo as duas coisas, eliminando a interface de conhecimento. Mas, o nível de conhecimento exigido hoje em cada área impede um profissional do tipo Leonardo da Vinci. Volto a mencionar as excelentes experiências que eu vivi com tecnologistas que

entravam no mérito de entender o comportamento do maciço, o que o maciço precisava em termos de uma resposta rápida do material. Numa palestra sobre a reologia do concreto projetado a pequenas idades, nos anos 90, assistida por Dick Robbins, na época dono da Robbins Company, fabricante de TBM, mostrei como o concreto projetado interage com o maciço, tendo, no início, de ser maleável, para deixar o maciço se deformar, o que possibilita a acomodação das tensões e a diminuição da demanda por resistência estrutural. Após a palestra, Dick me fez um convite honroso para que desenvolvêssemos um anel de TBM que reproduzisse essas propriedades do concreto projetado. Confesso que andei pensando sobre o assunto. No entanto, anos depois, vemos o uso do concreto projetado em túneis escavados por TBM, o que foi um grande avanço. Visitei, há poucos meses, o túnel Brenner, entre Itália e Áustria – esses túneis alpinos têm profundidades da ordem de 1000 metros e passam por situações de tensões elevadas e ‘squeezing’ muito pronunciadas. Em sua frente de escavação no lado austríaco, o TBM estava encalacrado. Vi o concreto projetado deformado, sofrendo, mas firme! Que anel pré-moldado teria capacidade de estar naquela posição? Difícil! Esses são exemplos de como as fronteiras devem ser cada vez menos rígidas entre essas três categorias de profissionais.

IBRACON – VOCÊ FOI PRESIDENTE DO COMITÊ BRASILEIRO DE TÚNEIS (CBT), DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE) E DA *INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA)*. QUAL SUA PERSPECTIVA DA ATUAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES TÉCNICAS NA SOCIEDADE? AS ASSOCIAÇÕES NACIONAIS TÊM DESEMPENHO SIMILAR AO DE SUAS CONGÊNERES INTERNACIONAIS?

T. B. C. – A ligação da ITA com a ONU (Organização das Nações Unidas) é muito estreita e vem de longa data, e se intensificou na presidência do Harvey Parker. A ONU tem parte de sua organização voltada para o aspecto do desenvolvimento urbano sustentável no mundo. A ITA busca mostrar para a ONU que desenvolvimento urbano sustentável passa pelo uso do espaço do subterrâneo. No dia 15 de fevereiro passado, aconteceu, na sede da ITA em Genebra, um workshop com a ONU para tratar desse assunto. Durante o período em que eu fui presidente da ITA conseguimos uma aproximação com o Banco Mundial, para mostrar a importância do treinamento de equipes que trabalham em obras de infraestrutura financiadas pelo ele. A ideia de minha gestão na ITA era nos aproximarmos de todas as agências que financiam obras de infraestrutura para mostrar a necessidade de que os profissionais encarregados pelo projeto e construção dos empreendimentos financiados por elas tivessem boa



formação em túneis. Durante a presidência do André Assis na ITA, ele criou a *ITACET Foundation*, para viabilizar treinamento em países em desenvolvimento, como a Nigéria, que terá a terceira maior população mundial daqui a 30 anos e precisará de tudo em termos de infraestrutura. A presidente atual da ITA, Jenny Yan, neste espírito, busca uma aproximação com o banco asiático de desenvolvimento.

Esse é o DNA da ITA. Para nossas associações no Brasil, eu continuo repetindo que temos de falar para o extramuro, não apenas para o intramuro, sobre a necessidade de boa engenharia. Tem havido progresso, mas há muito que avançar.

IBRACON – COMO UM PROFISSIONAL BRASILEIRO CONSEGUE DAR CONSULTORIA A AGÊNCIAS ESTRANGEIRAS, COMO O CONSELHO DE PESQUISA DA NORUEGA E A AGÊNCIA DO GOVERNO FRANCÊS PARA A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NUCLEARES (ANDRA)?

T. B. C. – Eu acho que os profissionais brasileiros são muito reconhecidos internacionalmente em função de sua capacidade. Não sou só eu dando consultoria em organismos ou projetos internacionais. No meu caso, algumas indicações vieram como resultado de algumas publicações específicas que fiz. Nós, brasileiros, em média, publicamos pouco. Temos mais capacidade do que mostrado no conjunto das nossas publicações. Deixo uma recomendação para

fazermos um esforço para publicarmos mais, pois isso engrandece o meio e as pessoas.

IBRACON – A QUE VOCÊ CREDITA O FATO DE O BRASIL, APESAR DE PROJETAR E EXECUTAR POUCOS TÚNEIS COMPARATIVAMENTE AO RESTANTE DO MUNDO, CHINA EM PARTICULAR, SEJA TÃO RESPEITADO TECNICAMENTE NA COMUNIDADE INTERNACIONAL, A PONTO DE TER TIDO DOIS PRESIDENTES DA ITA RECENTEMENTE?”

T. B. C. – O fato de o Brasil ter tido dois presidentes na ITA é, sem dúvida, uma demonstração do reconhecimento internacional da qualidade do nosso corpo técnico. No caso do Prof. André Assis, sua eleição está ligada à sua grande capacidade técnica. No meu, houve serendipidade reservada pela vida. Não era candidato, mas o pretendente ao posto desistiu de última hora. Já que o prazo para novas candidaturas havia passado, o conselho executivo, seguindo os estatutos, indicou meu nome para a assembleia geral.

IBRACON – HISTORICAMENTE, COMO OS MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS EVOLUÍRAM? O QUE PODEMOS ESPERAR DOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS NO FUTURO?

T. B. C. – Os métodos construtivos de túneis evoluíram muito nas últimas duas décadas. De um lado – os métodos convencionais, entre os quais o NATM, denominação controvertida, pois a ITA não utiliza o termo por se referir a um país – e de outro, os métodos mecanizados, com máquinas do tipo TBM, evoluíram muito. Ambos têm lançado mão das grandes vantagens e possibilidades trazidas pela digitalização, como a instrumentação, a capacidade de leitura e processamento de dados em tempo real, e a capacidade de tomada de decisão em função do que está sendo lido e processado. Com os métodos convencionais, por exemplo, as perfuratrizes de rocha, enquanto perfuram, investigam e mapeiam o maciço rochoso, adaptando o plano de fogo em função da resposta da perfuração. No início do ano passado, em Bolonha, uma conferência foi



Túnel Brenner entre a Itália e Áustria



EM MUITAS ÁREAS DA ENGENHARIA, O GRANDE PROFISSIONAL É AQUELE QUE ROMPE FRONTEIRAS, QUE DOMINA DUAS ÁREAS E CONSEGUE TRAZER OS ‘INPUTS’ DE UMA PARA A OUTRA





NA ITA NOS APROXIAMAMOS DE TODAS AS AGÊNCIAS QUE FINANCIAM OBRAS DE INFRAESTRUTURA PARA MOSTRAR A NECESSIDADE DE QUE OS PROFISSIONAIS ENCARREGADOS PELO PROJETO E CONSTRUÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS TIVESSEM BOA FORMAÇÃO EM TÚNEIS



organizada pelo grupo de jovens tuneleiros da Sociedade Italiana de Túneis, e o tema era exatamente esse – *Tunneling 4.0*. Em novembro do ano passado, quem ganhou a modalidade de inovação tecnológica na premiação da ITA foi um grupo de jovens malaios que desenvolveram um computador com um algoritmo de inteligência artificial, exatamente para conduzir um TBM com mais vantagem do que um ser humano. Então, esse é um universo em aberto, muito ao gosto dos nossos jovens. Muita coisa está para acontecer nessa área. Eu conclamo os jovens a enveredarem por esse ramo.

IBRACON – QUAIS CRITÉRIOS GERAIS DEVEM SER CONTEMPLADOS EM QUALQUER PROJETO DE TÚNEL DO PONTO DE VISTA DA SEGURANÇA, FUNCIONALIDADE E DURABILIDADE? QUAIS CRITÉRIOS ESPECIAIS DEVEM SER OBSERVADOS NOS PROJETOS ESTRUTURAIS DE DIFERENTES TIPOS DE TÚNEIS DE CONCRETO?

T. B. C. – Os critérios a serem observados nos projetos estruturais de túneis dependem da peculiaridade de cada túnel. No caso de anéis segmentados, o dimensionamento é feito em função das diversas etapas. Não necessariamente a etapa de resistir ao carregamento do maciço é a fase mais crítica. Em muitas situações, a fase de macaqueamento, quando o TBM aplica, com macacos, os esforços nos anéis montados para o avanço da cabeça de corte,

costuma ser a mais crítica. Por outro lado, num túnel hidráulico, a verificação de carregamento mais crítica é a da pressão interna de operação. Portanto, cada tipo de túnel tem suas peculiaridades de verificação estrutural. Quanto aos critérios de segurança e funcionalidade, o túnel não difere muito de uma estrutura convencional, ele apenas tem carregamentos que podem ser mais complexos, que podem variar desde a fase de transporte dos anéis pré-moldados até a fase de macaqueamento e operação, mas os critérios basicamente são os mesmos a que uma estrutura precisa atender na flexo-compressão em termos de esforços solicitantes e uma verificação de fissuração correlacionada com a questão da durabilidade. A diferença pode estar nas etapas de carregamento.

IBRACON – COMO O CONCRETO PROJETADO USADO PARA SUPORTE E REVESTIMENTO DE TÚNEIS EVOLUIU EM TERMOS DE SUA APLICAÇÃO, ADERÊNCIA À ROCHA, RESISTÊNCIA MECÂNICA, IMPERMEABILIDADE, DURABILIDADE E RESISTÊNCIA AO FOGO? QUAIS DEVEM SER AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS BÁSICAS DO CONCRETO PROJETADO PARA TÚNEIS?

T. B. C. – O concreto projetado evoluiu em todos esses pontos e em outros. Chama a atenção a introdução dos aditivos não alcalinos, que melhoraram muito a condição de saúde e segurança durante sua

aplicação. A aplicação do concreto projetado era, no passado, quase uma sentença de morte para o mangoteiro. Hoje, do ponto de vista de saúde e segurança, ela deixou de ser uma atividade tenebrosa. As técnicas de aplicação em grandes volumes são feitas hoje por robôs, com grande vantagem em relação às aplicações manuais. Essas mantiveram seu nicho, mas as aplicações com robôs são mais vantajosas do ponto de vista da garantia de qualidade. Com mecanismos servocontrolados, robôs, que leem a espessura enquanto projetam, garantem maior uniformidade.

A aderência à rocha tem evoluído bastante depois do trabalho de Gabriel Fernandez, da Universidade de Illinois, que desenvolveu o método de medida da aderência. Tudo aquilo que se consegue medir, se consegue melhorar! Uma casca de concreto projetado de 5 cm de espessura é capaz de suportar um bloco de granito de um metro quadrado de base, com vários metros de altura, resistindo ao cisalhamento e à força cortante ao longo do seu perímetro, principalmente por causa da adesão ao substrato circundante. É impressionante essa capacidade do concreto projetado! Quanto à resistência mecânica, 50 MPa é um número modesto atualmente, não sonhado há algumas décadas. Quanto à durabilidade, me lembro de um trabalho muito interessante do





Aplicação de concreto projetado com robô

Tomas Franzén, na década de 80, narrando a experiência de um concreto projetado com 50 anos de idade numa casa de força e em perfeitas condições na Suécia.

Quanto à resistência ao fogo, a introdução das microfibras sintéticas foi um grande passo. Essas fibras derretem sob fogo, promovendo caminhos de escape para eliminação do vapor responsável pelo aumento de volume e da pressão, que provoca o deslocamento do concreto projetado. Aqui, cabe mencionar a grande contribuição de um projeto pesquisa liderado por Paulo Helene, na Poli, no início dos anos 1990, responsável pela introdução do uso de fibras em concreto projetado por via úmida no Brasil, por norma para certificação do mangoteiro, etc. Talvez o mérito maior daquele projeto é que foi o embrião de pesquisa acadêmica sobre concreto projetado, tendo formado professores

do calibre de Figueiredo, Prudêncio, Armelin e outros, que deram continuidade ao tema com grande entusiasmo e competência. O projeto foi financiado pela CBPO, e coordenado pelo saudoso Pedro Boscov.

As características do concreto projetado para túnel dependem da sua utilização. O concreto

projetado para um túnel hidráulico deve ter uma capacidade maior relativa às resistências contra fenômenos do tipo da cavitação, o atrito com a água etc. Já o concreto projetado para uma estação de metrô precisa ter durabilidade.

Quanto à questão estética, o concreto projetado mostra-se como uma tela, como nas estações do metrô de Estocolmo, que foram oferecidas aos artistas da cidade. Em São Paulo ainda não temos esse uso das estações, mas espero que tenhamos em breve. Destaco, no Brasil, a estação Arco Verde, no Rio de Janeiro.

Quanto à permeabilidade do concreto projetado, o grande avanço nos últimos anos foi a introdução das membranas projetadas com material cimentício. A similaridade permite o monolitismo entre a casca primária e secundária, separada pela membrana de impermeabilização.

Existe uma tese doutorado recente

na Universidade de Trondheim, na Noruega, de autoria de Karl Gunnar Holter, que estudou a interação físico-química da membrana com a água. Apesar dos problemas de aplicação, as membranas para impermeabilização já evoluíram e tendem a evoluir bastante. Como no passado, tirou-se proveito do *single shell*, hoje deve-se tirar proveito do *composite shell*. Diferentemente do conceito em que o primário é abandonado, dimensionando o secundário para suportar todos os esforços, com o primário considerado estruturalmente, a economia é muito grande.

IBRACON – E QUANTO AO CONCRETO PRÉ-FABRICADO PARA SUPORTE E REVESTIMENTO DE TÚNEIS? COMO FOI A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA E DE SUA INDÚSTRIA?

T. B. C. – Na produção de anéis segmentados para revestimento de túneis escavados com TBM, a grande novidade dos últimos tempos é a introdução de fibras. Primeiramente, em conjunto com armadura convencional, mas hoje somente com uso de fibra. Em tantos lugares ao redor do mundo, inclusive aqui no Brasil, já se adotam anéis somente com fibras, tanto metálicas como sintéticas. A fibra simplifica o processo de industrialização, ao eliminar armadura com barras. Isso, juntamente com a evolução nos tempos e técnicas de cura, possibilitou a industrialização em larga escala, num processo altamente eficiente de

“

AMBOS [MÉTODOS CONVENCIONAIS E MECANIZADOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS] TÊM LANÇADO MÃO DAS GRANDES VANTAGENS E POSSIBILIDADES TRAZIDAS PELA DIGITALIZAÇÃO

”

“

QUANTO À QUESTÃO ESTÉTICA, O CONCRETO PROJETADO MOSTRA-SE COMO UMA TELA, COMO NAS ESTAÇÕES DO METRÔ DE ESTOCOLMO

”

produção de anéis de alta qualidade, em tempos muito curtos.

IBRACON – A TÉCNICA DE EXECUÇÃO DE TÚNEIS COM ADUELAS PRÉ-FABRICADAS DE AÇO (“TUNNEL LINER”) TEM MELHOR APLICAÇÃO EM QUAIS SITUAÇÕES? POR QUE AINDA É POUCO UTILIZADA EM NOSSO PAÍS?

T. B. C. – A técnica de *tunnel liner* tem melhor aplicação para a situação de um túnel curto, onde um TBM não é conveniente, e para a situação de um túnel de pequeno diâmetro, onde a aplicação de concreto projetado é difícil. Em qualquer outra situação, os túneis com concreto projetado ou o uso de *minishields* seriam mais adequados. A técnica de *tunnel liner* tem a desvantagem da dificuldade do preenchimento do vão entre o maciço escavado e a chapa metálica. No caso de concreto projetado, esse vazio nem existe, porque o concreto é lançado a alta velocidade e preenche todos os vazios. No caso de um túnel escavado com *shield*, o preenchimento é garantido com o processo de injeção pelos dispositivos do *shield*.

IBRACON – QUAL A OBRA DE TÚNEL MAIS IMPORTANTE QUE ESTÁ SENDO HOJE EXECUTADA NO BRASIL E/OU NO MUNDO? QUAIS OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS MAIS IMPORTANTES QUE ESTÃO SENDO ADOTADOS?

T. B. C. – Essa não é uma pergunta fácil de responder. No Brasil, pela ausência dos túneis, e no resto do mundo, ao contrário, pelo seu grande número. No Brasil, não há

nenhuma obra digna de destaque, infelizmente. Pode haver algum túnel rodoviário sendo construído, mas sem nenhuma característica que mereça maior destaque. No mundo, a construção de obras subterrâneas continua crescendo a uma taxa de 7% ao ano, maior do que a da construção em geral. Seguramente, se tivesse que escolher uma, escolheria um dos túneis longos da China, país que adota os túneis longos como um instrumento de sua política de Estado. Tive a oportunidade de assistir a uma conferência da Sociedade Chinesa de Ciência e Tecnologia há um ano, na qual um dos seus seminários, o único a ver com engenharia civil, era exatamente sobre túneis longos. A China planeja hoje a construção de um túnel para ligar o continente a Taiwan. No ano passado, o projeto de ponte e túnel ligando Hong Kong a Macau ganhou o prêmio de obra mais importante do ano da ITA. No Ocidente, eu citaria o Grand Paris, projeto de revitalização da cidade de Paris, que prevê a ampliação em 50% da sua rede de metrô, que já é muito grande. Paris é uma cidade que nasceu desde a sua origem com



Concreto projetado usado como tela por artistas no Metrô de Estocolmo, na Suécia

DNA para o bom uso do espaço subterrâneo.

IBRACON – QUANDO NÃO ESTÁ DANDO CONSULTORIA OU AULAS, O QUE GOSTA DE FAZER?

T. B. C. – Eu adoro ficar com meu primeiro neto, que tem dez meses. Felizmente, um segundo já está a caminho, eu estou feliz da vida com isso! Dada minha grande ocupação, reconheço que eu não me dediquei à minha família o tanto quanto eu gostaria. Mas a chegada do meu neto coincidiu com o fim do meu mandato na ITA, o que, talvez, me deu um pouco mais de tempo. É muito agradável quando posso ir à casa de minha filha ou quando eles vêm à minha casa. Quando isso não acontece, outra coisa que me dá muita satisfação, e que até combina com atividade de trabalhar, é ouvir música. Gosto muito de música! 🎧



Segurança contra incêndio em túneis

ANTÔNIO FERNANDO BERTO – PESQUISADOR, DOCENTE DO MESTRADO EM HABITAÇÃO

ANDRÉ LUIZ GONÇALVES SCABBIA – PESQUISADOR, DOCENTE DO MESTRADO EM HABITAÇÃO

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO (IPT)

COMITÊ BRASILEIRO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT CB-24)

RESUMO

Nos últimos 40 anos muitos acidentes ocorreram no interior dos túneis. O presente trabalho analisou alguns relatos, principalmente os que indicavam as causas e efeitos (mortes e feridos) desses sinistros. Posteriormente, se avaliou os eventos envolvendo situações de incêndio, buscando identificar as propostas de melhoria, realizadas de modo a viabilizar a retomada da operação comercial. Verificou-se que estas medidas de correção poderiam ser segregadas em oito grupos de controle, denominado neste trabalho como elementos de verificação, são

eles: (i) condutores e usuários; (ii) cargas transportadas; (iii) elementos estruturais e civis; (iv) operação do túnel, centralizada em Centro de Controle Operacional – CCO; (v) sistemas de segurança contra incêndio; (vi) sistemas mecânicos e eletroeletrônicos e suas infraestruturas; (vii) sistemas de informação aos usuários; (viii) serviços de manutenção e atualização periódica. Essas foram analisadas considerando uma abordagem integrada da segurança contra incêndio. Como resultado, propõe-se um sistema global de segurança contra incêndio para túneis que associa todos os elementos de verificação.

I. INTRODUÇÃO

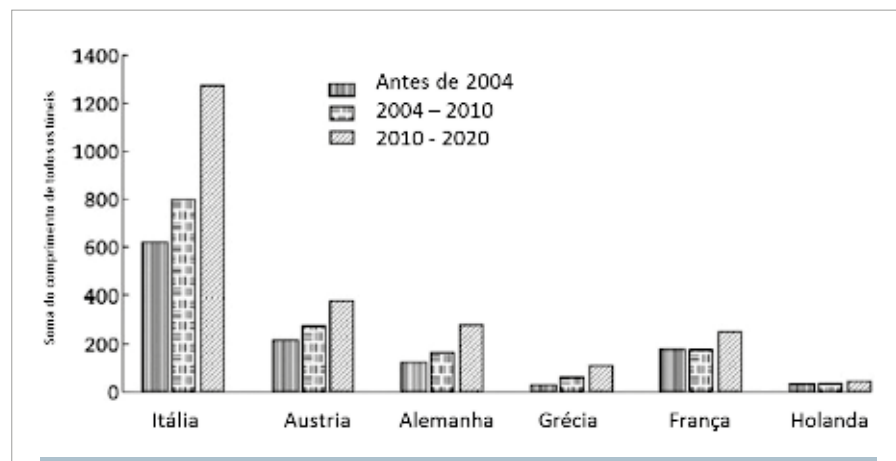
A construção de um túnel é uma solução para um problema específico, normalmente adotada como última alternativa, visando a transposição de obstáculos.

Apesar de tecnicamente ser, de modo geral, mais complexos e financeiramente mais dispendiosos, os túneis oferecerem as seguintes vantagens:

- definem menor intervenção no local, como foi o caso dos túneis da Rodovia dos Imigrantes, cujo impacto ocorre apenas na região dos emboques;
- permitem a transposição de cidades densamente povoadas sem interferência com o tráfego local, como é o caso do túnel de Costanera Norte, na cidade de Santiago, no Chile;
- encurtam distâncias, interligando regiões, como o exemplo do Eurotúnel.

Estudos internacionais, exemplificados por Ntzeremes e Kirytopoulos (2019), indicam a tendência de ampliação das malhas viárias na Europa por meio da implantação de novos túneis (Figura 1).

Essa tendência demonstra que os estudos relacionados a túneis, abordando as fases de projeto,



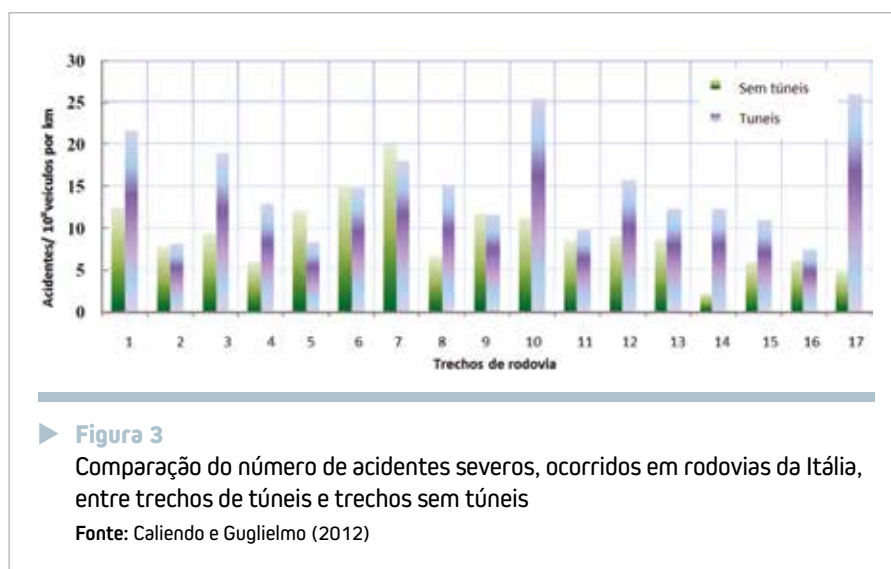
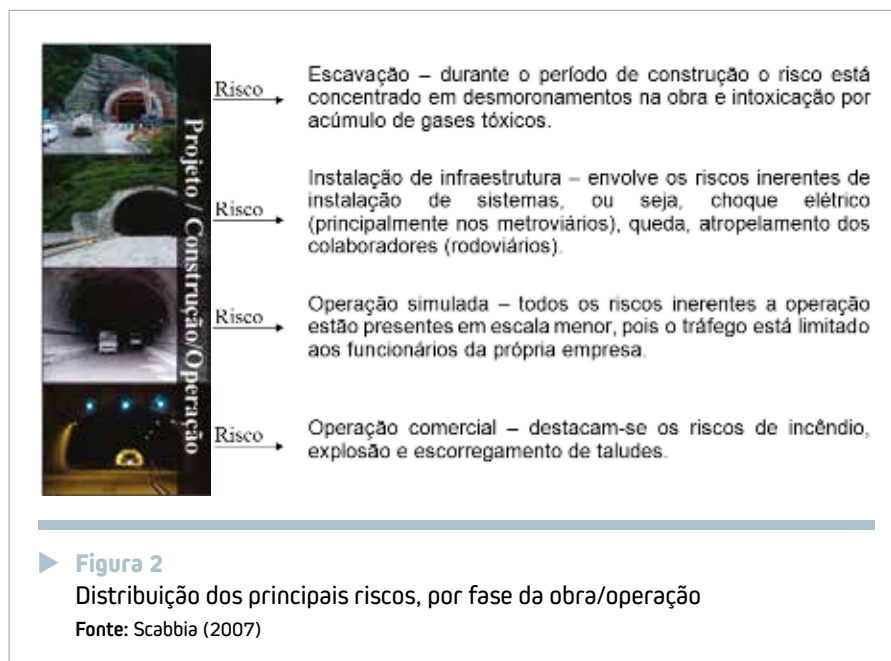
► **Figura 1**
Ampliação do sistema viário, por túneis, na Europa
Fonte: Ntzeremes e Kirytopoulos (2019)

implantação, operação ou manutenção, são cada vez mais necessários e devem envolver questões atuais, considerando a experiência acumulada com a operação dos túneis. Tais estudos, entre outras questões, buscam a atualização de procedimentos operacionais e a adequação técnica aplicada aos materiais empregados, aos sistemas eletroeletrônicos e ao treinamento de equipes.

Conforme Lees (1996), todas as tarefas que envolvem algum processo produtivo geram risco e podem ser analisadas individualmente ou sistemicamente. Portanto, em contrapartida às vantagens aqui relatadas, os túneis geram riscos que podem ser associados a cada etapa de sua vida útil, ou seja, da escavação à operação comercial (Figura 2).

Destaca-se, na Figura 3, o estudo realizado por Caliendo e Guglielmo (2012), conduzido por um período de quatro anos, em dezessete rodovias da Itália que possuem túneis em seu percurso. Como resultado, foi constatado que ocorriam, proporcionalmente, mais acidentes graves (com morte e feridos) no interior dos túneis, do que no restante da rodovia.

Em função dos riscos inerentes, durante o ciclo de vida de um túnel se faz necessária a realização sistemática de estudos multidisciplinares que vão desde a análise geológica até a operação comercial, envolvendo questões, tais como: geometria da pista; interação dos túneis com os veículos (trens, caminhões, ônibus) que ali irão circular; tipos de cargas transportadas; integridade física dos usuários durante a sua permanência em seu interior; caracte-



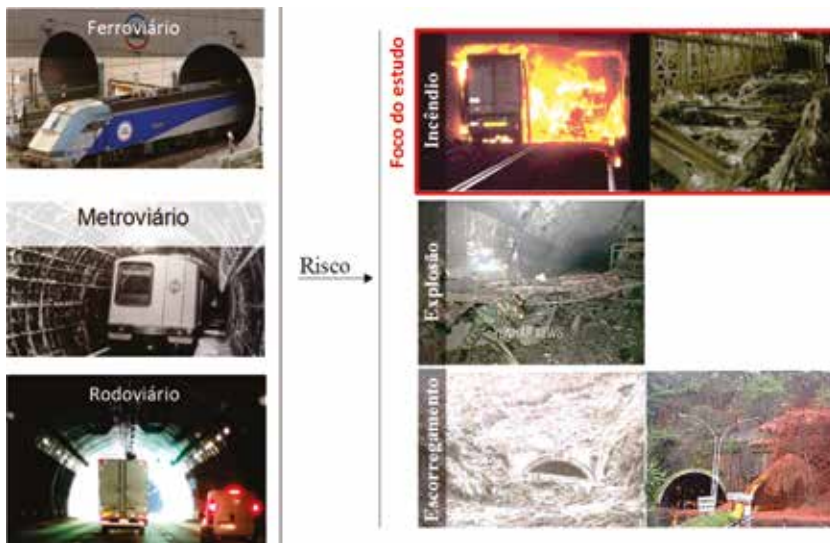
terísticas climáticas da localidade onde o túnel é instalado; e, por fim, a estrutura e infraestrutura do túnel que viabilizarão o funcionamento adequado do túnel frente às demandas colocadas.

Conforme Shida & Scabbia (2001), devem existir planos operacionais e de emergência, revisados periodicamente, que garantam a manutenção e a atualização das medidas de prevenção e proteção contra incêndio, determinada pela

inclusão de novos riscos, por exemplo, alteração no acondicionamento da carga transportada no interior do túnel e decorrente comportamento quando ignizada.

O presente trabalho tem como foco as questões relacionadas a incêndios que podem ocorrer durante a operação comercial dos túneis, sejam eles: metroviários; ferroviários, de carga, passageiros ou carga/passageiros ou rodoviários. (Figura 4).





► **Figura 4**
Riscos potenciais associados à operação de túneis
Fonte: Scabbia (2007)

2. HISTÓRICO DE EVENTOS

Propõe-se aqui analisar alguns eventos ocorridos em túneis, no sentido de identificar os erros cometidos que levaram à ocorrência de acidentes e, para alguns deles, as soluções que foram recomendadas para prevenir novos eventos danosos. Na Tabela 1 estão apresentados alguns exemplos notáveis.

Foram identificadas algumas recomendações, denominadas no presente artigo como propostas de melhorias, realizadas posteriormente aos acidentes. Essas ações,

► **Tabela 1 – Exemplos de acidentes ocorridos em túneis, em ordem cronológica**

Data	Local	Evento	Impacto (mortes e feridos)
11 de julho de 1979	Túnel de Nihonzaka Japão	Acidente envolvendo 170 carros	Sete pessoas morreram
7 de abril de 1982	Túnel Caldecott EUA	Acidente múltiplo que resultou em incêndio	Sete pessoas morreram
3 de novembro de 1982	Túnel de Salang Afeganistão	Comboio do exército choca-se com caminhão de combustível	Mais de 700 pessoas morreram (asfixiadas ou queimadas) – número final não oficializado
10 de Abril de 1995	Túnel de Pfänder Áustria	Quatro carros queimaram	Três pessoas morreram
10 de fevereiro de 1996	Túnel de Toyohama Japão	Escorregamento da encosta	20 pessoas morreram
18 de março de 1996	Túnel Palermo-Punta Rais Itália	Depois de uma colisão traseira um caminhão de combustível explodiu no túnel próximo a Palermo	19 carros se incendiaram, cinco pessoas morreram e 26 ficaram feridas
18 de novembro de 1996	Eurotúnel Canal da Mancha	Caminhão que viajava no trem de carga incendiou-se	30 pessoas sofreram intoxicação
24 de março de 1999	Túnel Montblanc Entre França e Itália	Caminhão belga que transportava farinha e margarina incendiou-se	39 pessoas morreram
29 de maio de 1999	Túnel Tauern Áustria	Após uma colisão traseira no um caminhão de tintas explodiu, o incêndio envolveu 24 veículos	12 pessoas morreram
10 de janeiro de 2000	Túnel Tauern Áustria	Incêndio envolvendo caminhão	—
10 de julho de 2001	Túnel Tauern Áustria	Colisão frontal provocou incêndio	— (condutor extinguiu o incêndio)
29 de julho de 2001	Túnel de Gleinalm Áustria	Motor de um ônibus de turistas suecos incendiou-se	(condutor retirou o veículo em chamas do túnel evitando uma catástrofe)
6 de agosto de 2001	Túnel de Gleinalm Áustria	Dois automóveis colidiram frontalmente, gerando incêndio	Cinco pessoas morreram e cinco ficaram feridas

Fonte: Modificado de Scabbia & Canale (2006) e *European Tunnel Assessment Programme* (2006)

obtidas dos relatórios oficiais ou de artigos que os referenciam, propõem melhores práticas de prevenção e proteção, de modo compatível com tecnologias existentes à época dos sinistros, que deveriam ser adotadas para a retomada de suas operações comerciais. Na prática, os estudos desses acidentes evidenciam os erros cometidos antes dos sinistros e favorecem a melhoria contínua de aspectos relacionados ao projeto e a operação de novos túneis. Seguem alguns exemplos de destaque.

2.1 Túnel de Nihonzaka

De acordo com o relato de Mashimo (2002), após o acidente foram tomadas as seguintes medidas específicas para a retomada das operações do túnel -é importante observar que, na ocasião do incêndio, esse túnel, a exemplo de muitos outros, não apresentava medidas voltadas para a proteção contra incêndio:

- ▶ proibir a circulação de caminhões com carga perigosa;
- ▶ proibir a ultrapassagem dentro do túnel;

- ▶ instalar radares para evitar a circulação em alta velocidade;
- ▶ instalar Painéis de Mensagens Variáveis – PMV nas entradas do túnel (dois em cada entrada) e mais dois internamente;
- ▶ unir os dois túneis, ou seja, anexar o túnel afetado pelo incêndio ao túnel paralelo (que tinha sentido contrário), transformando-os em unidirecionais, com quatro faixas de mesmo sentido;
- ▶ construir baias de emergência para carros no interior do túnel;
- ▶ melhorar a iluminação dentro do túnel;

▶ Tabela 1 – Exemplos de acidentes ocorridos em túneis, em ordem cronológica (cont.)

Data	Local	Evento	Impacto (mortes e feridos)
8 de Agosto de 2001	Túnel de Amberg Áustria	Dois ônibus colidiram	Três pessoas morreram
13 de agosto de 2001	Túnel de Reigersdorf Áustria	Ônibus se chocou contra a entrada do túnel	24 pessoas ficaram feridas
26 de agosto de 2001	Túnel de Gotthard Suíça	Colisão frontal	Seis pessoas ficaram feridas
31 de agosto de 2001	Túnel de Sonnstein Áustria	Três acidentes de tráfico em um único dia	Duas pessoas morreram e nove pessoas ficaram feridas
10 setembro de 2001	Túnel de Gleinalm Alemanha	Ônibus de turistas se incendiou	—
17 de outubro de 2001	Túnel Danish Dinamarca	Caminhão chocou-se com carro	Nove pessoas morreram e seis ficaram feridas
24 de outubro de 2001	Túnel de Gotthard Suíça	Colisão frontal de dois veículos gerando incêndio	11 pessoas morreram
16 de novembro de 2001	Túnel Madaoling China	Incêndio iniciou no motor de um veículo	12 pessoas morreram e seis pessoas ficaram feridas
18 de janeiro de 2002	Túnel Tauern Áustria	Caminhão incendiou-se (motor), produzindo grande quantidade de fumaça	—
1 de novembro de 2005	Túnel Dalseong Coréia do Sul	Caminhão com peças de missile explode após falha em seus freios	O número de mortes não foi divulgado
5 de julho de 2010	Túnel Huishan China	Incêndio criminoso	24 pessoas morreram
17 de março de 2014	Túnel Yanhou China	Choque de caminhões, um com carvão e outro com metanol provocando incêndio	40 pessoas morreram
17 de janeiro de 2015	Eurotunel Canal da Mancha	Operação comercial paralisada em razão do acionamento de alarme de detector de fumaça	—

Fonte: Modificado de Scabbia & Canale (2006) e *European Tunnel Assessment Programme* (2006)



- ▶ instalar sinalização semafórica (vermelho/verde) na entrada do túnel.

2.2 Túnel de Caldecott

O relatório do *National Transportation Safety Board* (1983) *Highway Accident Report Adopted: Multiple Vehicle Collisions And Fire Caldecott Tunnel Near Oakland, California* (April 7, 1982) define a necessidade de adoção das seguintes medidas adicionais:

- ▶ informar o motorista antes de sua aproximação do local do acidente;
- ▶ avaliar e revisar, onde necessário, procedimentos de emergência;
- ▶ desenvolver sistema com resposta rápida a emergências e treinar operadores do túnel em todas as fases da emergência, inclusive para casos de incêndio, com periodicidade, tal que possa evidenciar a capacidade dos funcionários;
- ▶ identificar de modo claro as saídas de emergência do túnel;
- ▶ proibir mudanças de pistas ou ultrapassagens no interior do túnel;
- ▶ melhorar as condições de supervisão do túnel e atuação por meio da adoção de sistema de comunicação e de segurança contra incêndio;
- ▶ proibir o ingresso de produtos perigosos no túnel;
- ▶ rever a administração federal da estrada e os programas urbanos de administração do transporte para que incentivem a segregação dos veículos, de modo a evitar que a estrada apresente um risco desnecessário ao público em função do compartilhamento da estrada com a movimentação de caminhões trafegando com produtos perigosos;
- ▶ monitorar os condutores com problemas médicos conhecidos;

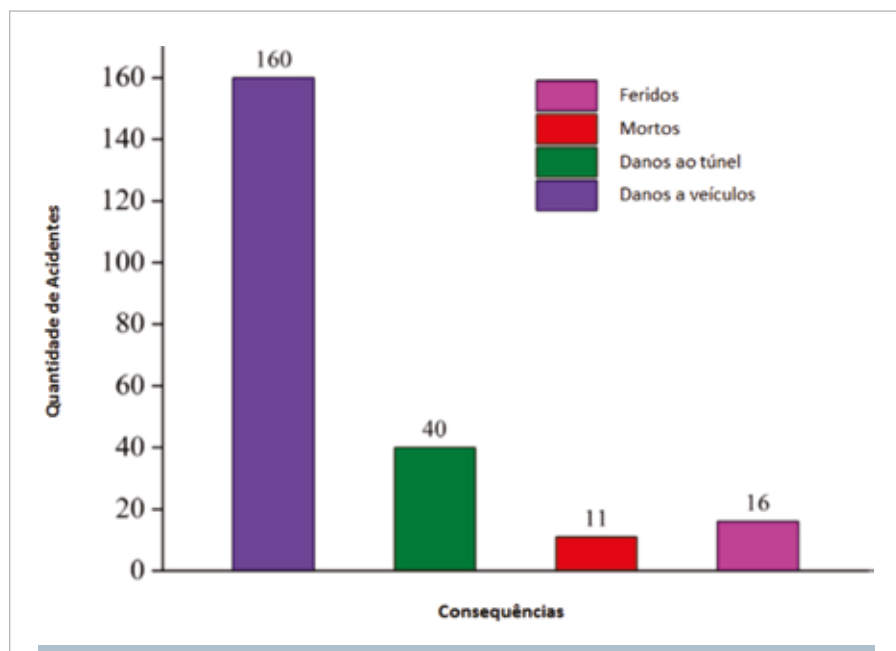
2.3 Eurotunnel

O relatório emitido conjuntamente pelo *Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre* (2010) e pelo *Rail Accident Investigation Branch* (1996) aponta a necessidade de adoção das seguintes melhorias:

- ▶ implantar dispositivos e procedimentos suficientemente confiáveis, voltados para mitigar os riscos associados à formação de arcos voltaicos entre objetos com altura excessiva, como partes de caminhão ou de sua carga útil, e a catenária;
- ▶ adequar sistema automático de detecção de incêndio, tornando-o mais rápido e confiável para qualquer princípio de incêndio;
- ▶ revisar o procedimento operacional quando da detecção de um incêndio;
- ▶ revisar procedimento para identificação de perigos e avaliação de riscos;
- ▶ rever a metodologia de controle do trabalho realizado por terceiros à operadora do túnel;
- ▶ melhorar os procedimentos relativos a gestão de crise, em caso de incêndio no túnel, de modo a permitir a retirada de passageiros em um período de tempo aceitável e o início rápido do combate ao incêndio.

2.4 Túnel de Montblanc

O Relatório do *Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement* (1999) aponta a necessidade de consideração das seguintes ações



▶ **Figura 5**
Consequência dos incêndios ocorridos na China entre 2000 e 2016
Fonte: Ren et al. (2019)

para aprimoramento da segurança contra incêndio:

- ▶ examinar a possibilidade de reduzir os riscos potenciais de incêndio por meio do controle dos materiais transportados;
- ▶ examinar a possibilidade de inspeção dos veículos antes de seu ingresso no túnel;
- ▶ instalar sistema automático de detecção de incidentes (DAI);
- ▶ adotar Centro de Controle de Operações – CCO único;
- ▶ implantar operação viária capaz de supervisionar e quantificar os veículos no interior do túnel, para permitir ação rápida e eficaz em situação de incêndio;
- ▶ garantir que os sistemas/equipamentos, principalmente os sistemas elétricos e de comunicação no interior do túnel, mantenham-se em operação durante a ocorrência de incêndio;

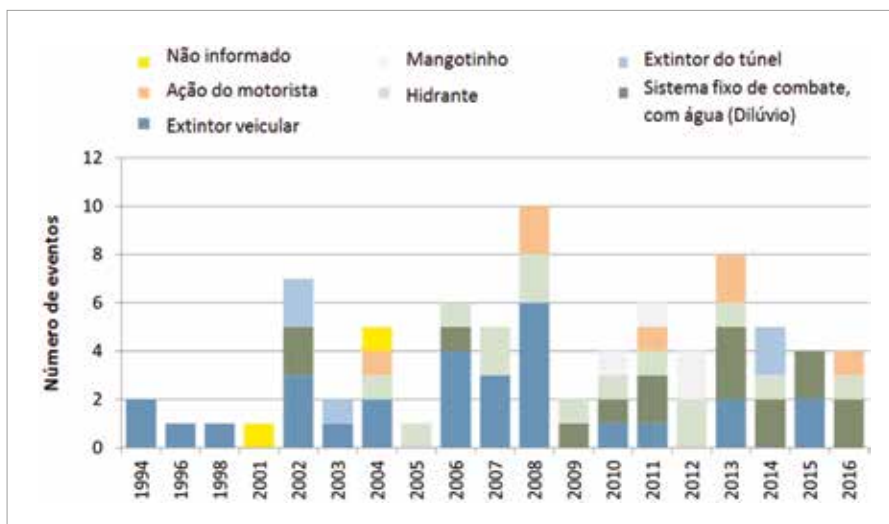


Figura 6
Eventos que envolveram o uso de sistema de combate contra incêndio nos principais túneis na Austrália, entre 1994 e 2016

Fonte: Casey (2020)

- ▶ informar usuários sobre a ocorrência de incêndio, de modo claro, com sinalização visual e sonora, indicando automaticamente as saídas de emergência;
- ▶ implantar serviço ininterrupto de primeira atuação, composto por equipe de três a cinco especialistas, capaz de atuar em 5 minutos após a identificação da ocorrência;

Tabela 2 – Normas de Segurança relacionadas a túneis

País / Local	Norma	Título	Revisão válida em 1999	Revisada ou implantada posteriormente aos acidentes
EUA	NFPA 502	NFPA 502: <i>Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways</i> e AASTHO	1987	2001
União Européia	Directiva 89/106/ da União Européia	Requisitos mínimos de segurança para os túneis da Rede Rodoviária Transeuropéia	1988	2002 – 2004
Austrália	<i>Australasian Fire Authorities Council</i>	<i>Fire Safety Guidelines For Road Tunnels</i>	—	2001
Brasil	ABNT NBR 15661	Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos	—	2009
	ABNT NBR 15775	Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Ensaios, comissionamento e inspeções	—	2009
	ABNT NBR 15981	Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Sistemas de sinalização e de comunicação de emergências em túneis	—	2011
	ABNT NBR 16484	Segurança contra incêndio para sistemas de transporte sobre trilhos – Requisitos	—	2017
	ABNT NBR 16736	Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos – Operação de emergência em túneis rodoviários e urbanos	—	2019



- ▶ adotar plano único de atuação, considerando os dois lados de emboque (França e Itália).

2.5 Incêndios na China

Tendo como referência dados estatísticos de incêndios, ocorridos entre 2000 e 2016, na China, Ren *et al.* (2019) avaliou 161 eventos de incêndio, considerados de grande e médio porte. Entre os casos analisados, 40 eventos, ou seja, 24,8%, geraram danos à estrutura ou infraestrutura do túnel e 11 casos provocaram mortes no interior dos túneis (Figura 5). Foram recomendadas ações quanto a implantação de medidas de proteção passiva. Em função dos danos constatados, os autores fizeram diversas recomendações de melhorias, aderentes às recomendações feitas nos eventos relatados anteriormente.

2.6 Incêndios na Austrália

Conforme Casey (2020), a Austrália adota, desde 2002, sistemas fixos de combate ao incêndio com água, do tipo Dilúvio, no interior de alguns túneis. Em, aproximadamente, 50% dos eventos danosos, onde se utilizou o sistema de dilúvio, o incêndio foi extinto. Nos demais eventos eles limitaram o incêndio e a equipe de operação realizou o término do combate (Figura 6).

3. AVANÇOS A PARTIR DA ANÁLISE DOS INCÊNDIOS

Após o acidente no túnel de Montblanc, em 1999, as normas que regem a segurança em túneis, com especial destaque para os rodoviários, começaram a ser ajustadas em

vários países, de modo a orientar a aceitação de demandas operacionais e prevenir acidentes, incluindo incêndios.

No Brasil, na mesma época, por meio do CB24 - Comitê Brasileiro de Segurança Contra Incêndio, da ABNT, iniciou-se a elaboração de norma voltada à proteção contra incêndios em túneis e, posteriormente, a norma relacionada aos sistemas de segurança contra incêndio em túneis (Tabela 2).

Pode-se identificar nas normas em vigor, nacionais e internacionais, diversos elementos de verificação de segurança contra incêndio e segregá-los em oito grupos, como segue:

- 1) Características dos condutores e usuários, sejam dos trens, ônibus, caminhões, veículos de apoio ou de passeio;
- 2) Controle das cargas transportadas, pois, de posse da carga térmica dos veículos que trafegam nos túneis, calcula-se as proteções a serem implantadas, sejam passivas (associadas à estrutura e infraestrutura), sejam ativas, que envolvem, entre outros, sistemas mecânicos e eletroeletrônicos;
- 3) Elementos estruturais e civis, compostos por: (i) estruturas de concreto, (ii) estruturas metálica, (iii) estruturas mista, (iv) sistema de drenagem de água de infiltração, (v) pavimento, sejam pistas, no caso rodoviário, sejam vias, no caso metro-ferroviário;
- 4) Operação do túnel centralizada em Centro de Controle Operacional – CCO, realizadas por meio de equipes treinadas, executando procedimentos operacionais

ou de emergência, com o uso de ferramentas compatíveis;

- 5) Adoção de sistemas de segurança contra incêndio, composto por resistência ao fogo dos elementos estruturais e civis do túnel; reação ao fogo dos materiais presentes no interior do túnel; detecção, seja de incidentes, seja de incêndio; ventilação; iluminação normal e de emergência; sistemas de extinção do fogo e de saída de emergência;
- 6) Adoção de sistemas mecânicos e eletroeletrônicos, e respectivas infraestruturas;
- 7) Adoção de sistemas de informação aos usuários, composta por sinalizações verticais e horizontais, sistemas sonoros de aviso ao público, indicações das equipes de operação;
- 8) Manutenção e atualização periódica, quando da realização de alterações, sejam elas nos procedimentos operacionais, demandas dos usuários, substituição de componentes e sistemas do túnel, legislações e normas.

Destaca-se que os quatro primeiros elementos de verificação apresentados (Condutores e usuários, Cargas transportadas, Elementos estruturais e civis, Operação do túnel centralizada em CCO) condicionam diretamente os demais elementos.

Na Tabela 3 estão apresentadas as propostas de melhoria que foram definidas após incêndio de alguns túneis, associadas aos elementos de verificação estabelecidos, comprovando-se que, de alguma maneira, todos foram considerados para a composição da segurança contra incêndio e a retomada de operação comercial.

Deve-se observar que entre os elementos de verificação, além dos sistemas de proteção contra incêndio, claramente associados ao controle do incêndio, estão contempladas, nos outros elementos, predominantemente, as ações de prevenção contra incêndio.

É importante observar que, para todos os acidentes apontados na Tabela 3, considera-se a necessidade dos condutores e usuários atenderem aos comandos operacionais. Tal situação decorre da constatação, nos eventos estudados, que, de modo geral, esses não se dirigiram às saídas de emergência, pelo principal fato de não terem sido alertados para a gravidade do evento. Sob esse ponto de vista, tal ação

tem natureza protetora e depende de outros elementos voltados para a segurança contra incêndio.

Em todos os casos apontados na Tabela 3 considera-se necessária a definição e controle das cargas presentes nos túneis, inclusive a limitação da toxicidade gerada quando de sua ignição. Da mesma forma, a existência, ou revisão, de procedimentos de atuação operacional, com gestão centralizada em um Centro de Controle Operacional, são sempre consideradas.

A existência de danos na estrutura do túnel também é indicada em todas as análises efetuada, como um problema importante, apesar de terem sido incluídas propostas explícitas de melhorias.

Os sistemas de proteção contra incêndio, os sistemas mecânicos e eletroeletrônicos e os sistemas de informação aos usuários são apresentados em todos os eventos, sempre com a recomendação destacada de proceder-se sua revisão, ampliação ou modernização. Portanto, o processo de atualização tecnológica de todos esses sistemas, ao longo da operação comercial dos túneis, foi considerado deficiente e decisivo para a ineficácia do controle do foco de incêndio e do processo de evacuação dos túneis.

De acordo com Shida & Scabbia (2001), por mais que sejam inseridos nos túneis sistemas automáticos de controle ou de supervisão, esses não substituem, mas apenas

► Tabela 3 – Propostas de melhoria consideradas a partir da análise dos incêndios associadas aos elementos de verificação

Túnel (histórico de eventos retirado da Tabela 1)	Elementos de verificação													
	Condutores e usuários	Controle das cargas transportadas	Elementos estruturais e civis	Operação do túnel centralizada em CCO	Sistemas de proteção contra incêndio						Sistemas mecânicos e eletroeletrônicos	Sistemas de informação aos usuários	Manutenção e atualização periódica	
					Resistência ao fogo do revestimento do túnel	Reação ao fogo	Deteção de incidentes ou incêndio	Ventilação	Iluminação	Extinção do fogo				Saída de emergência
Nihonzaka	x	x	x	x	(*)	(*)	x	x	x	(*)	x	x	x	x
Caldecott	x	x	x	x	(*)	—	x	—	—	—	x	—	x	—
Afeganistão	x	x	x	x	(*)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
King's Cross	x	x	x	x	(*)	x	—	x	x	—	—	—	x	x
Palermo – Itália	x	x	x	x	(*)	—	—	—	—	—	—	—	x	—
Canal da Mancha (1996)	x	x	x	x	(*)	x	—	—	x	x	—	—	—	—
Mont Blanc	x	x	x	x	(*)	x	x	—	x	—	—	x	x	—
Tauern	x	x	x	x	(*)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Reigersdorf	x	x	x	x	(*)	—	—	—	—	—	—	—	x	—
Canal da Mancha (2015)	x	x	x	x	(*)	—	—	—	—	x	x	x	—	—
China 2000 – 2016	x	x	x	x	x	x	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Austrália (1994 – 2016)	x	x	(*)	x	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	x	(*)	(*)	(*)	(*)

(*) Não era foco da análise



► Tabela 4 – Relação entre as normas brasileiras e os elementos de verificação

Normas	Escopo	Elementos de verificação														
		Condutores e usuários	Controle das cargas transportadas	Elementos estruturais e civis	Operação do túnel centralizada em CCO	Sistemas de proteção contra incêndio								Sistemas mecânicos e eletroeletrônicos	Sistemas de informação aos usuários	Manutenção e atualização periódica
						Resistência ao fogo do revestimento do túnel	Reação ao fogo	Deteção de incidentes ou incêndio	Ventilação	Iluminação	Extinção do fogo	Saída de emergência				
ABNT NBR 15661	Projeto e operação de túneis com tráfego de veículos, em ambiente rodoviários e urbanos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
ABNT NBR 15775	Ensaio, comissionamento e inspeções para todos os tipos de túneis	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
ABNT NBR 15981	Sistemas de sinalização e de comunicação de emergências em túneis	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
ABNT NBR 16484	Projeto e operação de túneis com sistemas de transporte sobre trilhos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
ABNT NBR 16736	Operação em caso de emergência em túneis rodoviários e urbanos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

auxiliam as equipes operacionais. Durante um sinistro, as pessoas que estão no interior do túnel sempre necessitam de apoio, via interven-

ção humana devidamente equipada.

Nos textos das normas ABNT NBR referentes à segurança contra incêndio em túneis, em vigor no Bra-

sil, conforme apontado na Tabela 4, todos os elementos de verificação apontados estão presentes. Essas normas definem diretrizes, requisitos e critérios de segurança contra incêndio, que levam em conta o estado da arte de cada um dos sistemas que compõem os elementos de verificação.

4. APLICAÇÃO DO SISTEMA GLOBAL DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

Analisando-se a proposta de abordagem sistêmica de segurança contra incêndio proposta por Berto (2019), consolidada na Figura 7, constata-se que as ações de segurança se associam às distintas fases do desenvolvimento do incêndio, assumindo inicialmente o propósito



► **Figura 7**
Abordagem sistêmica da segurança contra incêndio

Fonte: Berto (2019)

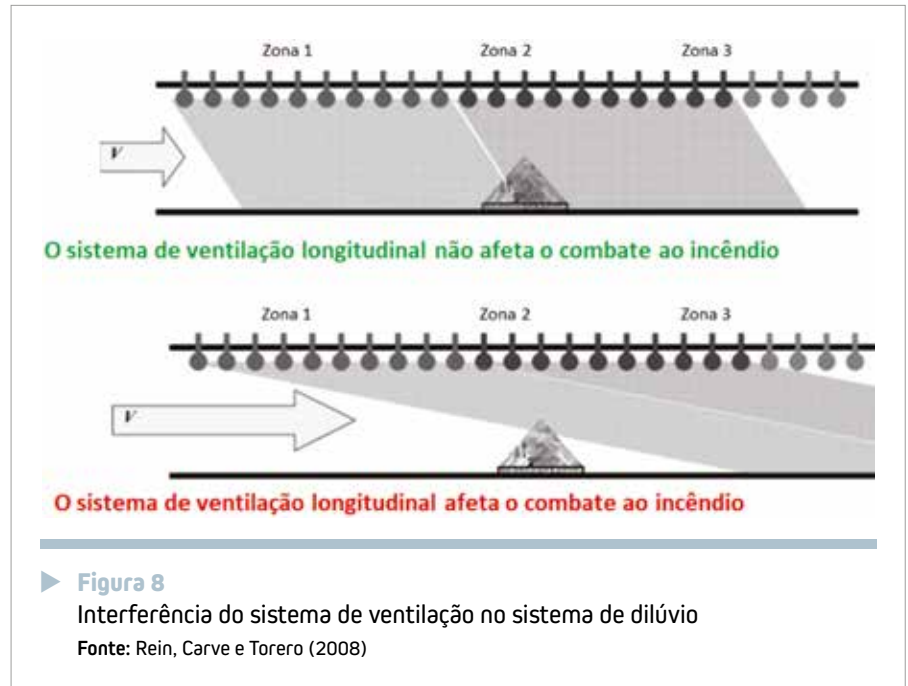
de limitar o risco de surgimento do foco e, na medida em que o incêndio, eventualmente, se desenvolva, limitando o risco de que avance além das vizinhanças do local onde se iniciou e, ainda, que a fumaça gerada tenha sua propagação controlada.

O estudo isolado de cada elemento de verificação, desconsiderando suas interações com os demais, ou seja, desconsiderando uma abordagem sistêmica, pode, além de não resolver o seu problema específico, propiciar a criação de novos riscos ou a inutilização de outro sistema de proteção contra incêndio adotado.

Um exemplo notável dessa situação corresponde à possibilidade da interação negativa entre o sistema de ventilação longitudinal e o sistema fixo de combate ao incêndio, empregados sem a visão sistêmica da segurança contra incêndio. Essa situação é exemplificada por Rein, Carve e Torero (2008), que apresentam um caso em que o sistema de ventilação longitudinal, que está extraindo os fumos do interior do túnel, compromete a atuação do sistema de dilúvio. Quando a velocidade do ar aumenta no interior do túnel, as gotículas de água podem deixar de atingir o foco do incêndio, tornando o combate ineficaz (Figura 8).

Quando se relaciona os conceitos da abordagem sistêmica da segurança contra incêndio, as propostas de melhoria pós-incêndio e os elementos de verificação, constata-se uma sequência de eventos, conforme apresentado na Figura 9.

O ciclo operação comercial – identificação de foco de incên-



dio – extinção do foco do incêndio, se constitui em modo ideal de garantia da segurança contra incêndio e deve, portanto, receber atenção destacada na sua concepção/composição.

A limitação do crescimento do foco do incêndio, que ocorre de

modo passivo, deve ser complementada com as ações de extinção, definindo o momento crucial a partir do qual todas as demais ações de proteção contra incêndio devem operar. Com tal propósito propõe-se um sistema global de segurança contra incêndio para túneis,





► **Figura 10**
Sistema global de segurança contra incêndio para túneis

capaz de estruturar e sincronizar, de modo sistêmico, a segurança contra incêndio desses locais (Figura 10).

O sistema global de segurança contra incêndio para túneis possui cinco etapas de atuação. Inicia pelo ciclo de operação comercial, manutenção (inspeção e correção de falhas) e atualização, realizada periodicamente nos procedimentos de operação e de emergência, nos sistemas de materiais aplicados ou utilizados no túnel. Esta é a fase mais importante, pois na ocorrência de sinistros, sistemas que não foram exigidos por longos períodos serão

utilizados e, para tanto, devem estar, não só disponíveis, mas operacionais, em plena capacidade de uso, conforme previsto em projeto e comprovado em comissionamento e em inspeções periódicas.

Quando o foco do incêndio for detectado, aplicam-se os procedimentos de emergência, com o uso dos dispositivos adequados, de modo conjunto, e coordenados pelo CCO.

Caso o foco do incêndio não seja contido, inicia-se a fase mais crítica, pois se deve, simultaneamente, retirar as pessoas do interior do túnel,

de modo organizado, por um trajeto com o mínimo de fumaça, atender possíveis feridos, combater o incêndio, entre outras tarefas, sendo todas importantes. O sistema global de segurança contra incêndio adotado deve incluir equipe treinada, procedimentos de operação e de emergência atualizados, elementos estruturais e civis adequados a este tipo de evento e sistemas de proteção contra incêndio em perfeitas condições operacionais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS


Parte das questões abordadas

neste artigo foram relatos de incêndios mencionados na Tabela 1.

Até agora, felizmente, o Brasil não está incluído nesta lista, composta por ocorrências de incêndios graves em túneis. Na medida em que os nossos túneis envelheçam e aumentem em quantidade, ampliam-se as chances de que tenhamos, por aqui, eventos catastróficos equivalentes aos relatados.

Para os túneis em operação, construídos anteriormente à publicação das normas brasileiras em vigor, destaca-se que devem passar por processo de atualização tecnológica, tendo em vista os riscos inerentes e, especialmente, a segurança dos usuários. Para isso, as propostas aqui incluídas de abordagem sistêmica podem ser úteis e servir como parâmetro para a adoção dos

requisitos das normas e regulamentações brasileiras.

Espera-se que o presente trabalho contribua para a divulgação do problema do incêndio em túneis e da abordagem sistêmica que deve ser adotada. As ações devem se iniciar e se desenvolver por meio de processos consistentes de gerenciamento abrangendo projeto, construção, manutenção, atualização tecnológica e operação. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. A policy on geometric design of highways and streets. Washington, D.C., AASTHO - 2001.
- [2] AUSTRALASIAN FIRE AUTHORITIES COUNCIL. Fire Safety Guidelines for Road Tunnels. [S.l.], AFAC, 2001. 45 p.
- [3] BERTO, A. F. Problemas reais com as instalações de proteção contra incêndio. In: FÓRUM DE INSTALAÇÕES BIP, 10., 2019, São Paulo. Apresentações... São Paulo: Abrinstal, 2019. Disponível em http://www.abrinstal.org.br/eventos/realizados/docs/190706_10forum_apres01.pdf. Acesso em: 02 fev. 2020.
- [4] BUREAU D'ENQUÊTES SUR LES ACCIDENTS DE TRANSPORT TERRESTRE. Rail Accident Investigation Branch. Technical Investigation Report concerning the Fire on Eurotunnel Freight Shuttle 7412 on 11 september 2008. França, BEA-TT; RAIB, 2010. 168 p.
- [5] CALIENDO. C.; GUGLIELMO. M. L. Accident Rates in Road Tunnels and Social Cost Evaluation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 53, p. 166 – 177, Oct. 2012.
- [6] CASEY, N. Fire incident data for Australian road tunnels. *Fire Safety Journal*, v. 111, p. 102909, Jan. 2020.
- [7] EUROPEAN TUNNEL ASSESSMENT PROGRAMME, Annual Report – 2006. [S.l.]: EuroTAP, 2006. 50 p.
- [8] LEES, F. P. Loss prevention in the process industries. 2. ed. Oxford :Butterworth-Heinemann, 1996. 3 v.
- [9] MASHIMO H. State of the road tunnel safety technology in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 17, n. 2, p. 145–152, Apr. 2002. (Tradução Isami Ota).
- [10] MINISTÈRE DE L'INTERIEUR MINISTÈRE DE L'EQUIPEMENT DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. Inspection générale Conseil général de l'administration des ponts et chaussées; Rapport de la mission administrative d'enquête technique sur l'incendie survenu le 24 mars 1999 au tunnel routier du Mont Blanc. [S.l.]: MLMLTL, 1999. 78 p.
- [10] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. Highway Accident Report Adopted: Multiple Vehicle Collisions and Fire Caldecott Tunnel Near Oakland, California April 7, 1982. Washington DC: NTSB, 1983.
- [12] NTZEREMES. P.; KIRYTOPOULOS. K. Evaluating the role of risk assessment for road tunnel fire safety: a comparative review within the EU. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, (english edition), v. 6, n. 3, p.282 -296, June 2019.
- [13] REAL, M. V. A Informação como fator de controle de riscos no transporte rodoviário de produtos perigosos. 2000. 220 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Transporte) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- [14] REIN, G.; CARVE, R.; TORERO, J. L. Approximate trajectories of droplets from water mist suppression systems in tunnels. Edinburgh: University of Edinburgh, Centre for Fire Safety Engineering, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/1087989/Approximate_Trajectories_of_Droplets_from_Water_Mist_Suppression_Systems_in_Tunnels. Acesso em: 02 fev. 2020.
- [15] REN, R. et al. Statiscal Anlysis of fire accidents in chinese highway tunnel 2000 – 2016, *Tunnelling and Underground Space Tecnology*, v. 83, p. 452-460, 2019.
- [16] SCABBIA, A. L. G. Túneis rodoviários: proposta de avaliação de conformidade para liberação ao uso e operação comercial. 2007. Tese (Doutorado em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi:10.11606/T.18.2007.tde-17012011-125628. Acesso em: 02 fev. 2020.
- [17] SCABBIA, A. L. G.; CANALE, A. C. Proteção contra incêndios em túneis: -tecnologias atuais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE INCÊNDIO, 15., 2006, São Paulo. Anais... [S.l.]: COBENI, 2006.
- [18] SHIDA, L.; SCABBIA, A. L. G. Modelo operacional: adequação da capacidade à demanda com incorporação da pista descendente. São Paulo: Artesp, 2001. (Apresentação realizada em 2001).
- [19] UNIÃO EUROPÉIA. Diretiva 2004/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Abril de 2004, relativa aos requisitos mínimos de segurança para os túneis da Rede Rodoviária Transeuropéia. Bruxelas: EU, 2004. (Esta Directiva for alterada pela Decisão do Comité Misto Do EEE (Espaço Econômico Europeu,) No 10/2006 de 27 de Janeiro de 2006 que altera o Anexo XIII (Transportes) do Acordo EEE).
- [20] UNIÃO EUROPÉIA. Proposta de DIRETIVA 2002/309/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativo aos requisitos mínimos de segurança para os túneis inseridos na Rede Rodoviária Transeuropeia. Bruxelas: EU, 30 dez. 2002. (COM(2002) 769 final 2002/0309 (COD)).



Túnel de interligação da Torre Mata Atlântica com o Setor Parking da Cidade Matarazzo

RODOLFO ANDRÉO SIMONI – ENGENHEIRO, ESPECIALISTA EM PROJETOS | BRUNO M. G. SCODELER – ENGENHEIRO MSc., ESPECIALISTA EM PROJETOS

MAFFEI ENGENHARIA

CARLOS EDUARDO M. MAFFEI – ENGENHEIRO TITULAR, PROFESSOR

MAFFEI ENGENHARIA
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

I. INTRODUÇÃO

Hospital Umberto I, também conhecido como Hospital Matarazzo, foi inaugurado em 1904, na cidade de São Paulo. Situado na rua Itapeva, a um quarteirão da av. Paulista, este complexo hospitalar teve os prédios tombados como patrimônios históricos em 1986 e acabou encerrando suas atividades em 1993. Após quase vinte anos, o antigo hospital, com cerca de 27 mil metros quadrados de terreno, foi adquirido pelo Grupo Allard para dar lugar à Cidade Matarazzo, com o desafio não apenas de preservar e restaurar os prédios tombados, mas também de integrá-los ao novo conceito arquitetônico do empreendimento.

Os setores Torre e Parking do referido empreendimento possuem oito subsolos cada, sendo a maior parte dos mesmos destinada ao estacionamento de veículos, motocicletas e afins, de forma a atender aos requisitos de quantidades mínimas de vagas fixados pela Lei Municipal nº 16.402.

Uma vez que o empreendimento comportará variados estabelecimentos e atrações, tais como hotel, prédio de



escritórios, teatro, shopping, restaurantes, entre outros, haverá variados picos de demanda que, por vezes, irão requerer um balanceamento entre estacionamentos. Dessa forma, para assegurar a adequada operação do empreendimento, os empreendedores, arquitetos e demais interessados decidiram criar uma interligação entre os setores Torre e Parking, no nível do quarto subsolo

(N-04), o que implicou a construção do túnel tema deste artigo (Figura 1).

2. CONCEPÇÃO E DESCRIÇÃO DO TÚNEL

Primeiramente, definiu-se a localização em planta da interligação entre os setores Torre e Parking (Figura 1). Apesar da descondição em relação às paredes de contenção, o que implica

maiores dificuldades construtivas, a locação da interligação foi definida de modo a minimizar a perda de vagas de estacionamento nas áreas adjacentes aos emboques (encontros da interligação com as contenções).

Por se tratar de uma obra predial, os empreendedores e arquitetos acreditavam que a referida interligação entre os níveis N-04 seria construída como uma trincheira, seguida de um posterior reaterro. Para tal, seria necessário remover importantes árvores de preserva na superfície do terreno e executar paredes de contenção paralelas ao alinhamento da interligação. No entanto, além da questão ambiental, a solução de trincheira também implicaria dificuldades executivas, tais como:

- ▶ Interferências com os tirantes de ancoragem das paredes de contenção dos setores Torre e Parking, principalmente em função da implantação esconsa;
- ▶ Necessidade de execução das contenções em duas etapas, haja vista a proximidade com a divisa do terreno e o desnível, de cerca de 5,5m, existente entre o terreno do empreendimento e as edificações vizinhas.

Dessa forma, para superar todas as dificuldades supracitadas, a Maffei Engenharia recomendou que a interligação entre os níveis N-04 dos setores Torre e Parking fosse executada em túnel, através do chamado método NATM (*"New Austrian Tunneling Method"*).

De maneira sucinta, o método em questão, amplamente utilizado na execução de túneis rodoviários e metroviários, visa o aproveitamento da capacidade resistente do maciço circundante como parte integrante do suporte para a escavação do túnel. Para tal, é necessária a adoção de escavações par-

cializadas, realizadas em pequenos avanços, e a utilização de revestimento que tenha baixa rigidez inicial em relação ao maciço, permitindo que o mesmo sofra pequenas deformações, suficientes para mobilizar sua resistência ao cisalhamento; é justamente por isso que o concreto projetado tornou-se o material mais empregado na execução de revestimentos primários de túneis em NATM.

Devido às características acima mencionadas, a instrumentação e monitoramento dos deslocamentos do maciço e do revestimento do túnel tornam-se procedimentos inerentes à metodologia NATM, tendo em vista a heterogeneidade do solo e a necessidade de validação das hipóteses adotadas em projeto.

No caso do túnel da Cidade Marrazzo, havia duas condicionantes de execução bastante favoráveis:

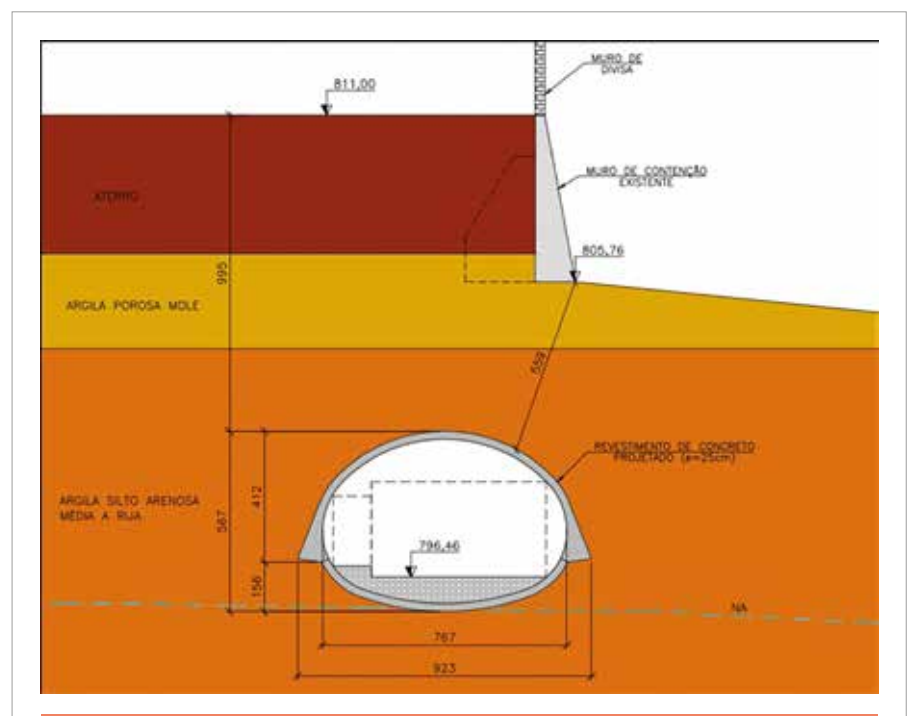
- i. O maciço composto por solos argilosos de consistência média a rija;

- ii. A ausência de nível d'água (NA) na cota de implantação do túnel.

A elevada coesão das argilas confere ao maciço boa estabilidade face a escavações e boa capacidade de suporte, o que, juntamente com a ausência de NA, implica baixa necessidade de tratamentos de solo. Dessa forma, a única preocupação de projeto foi dimensionar o revestimento do túnel para suportar a distorção causada pelo carregamento assimétrico do terreno devido ao desnível existente.

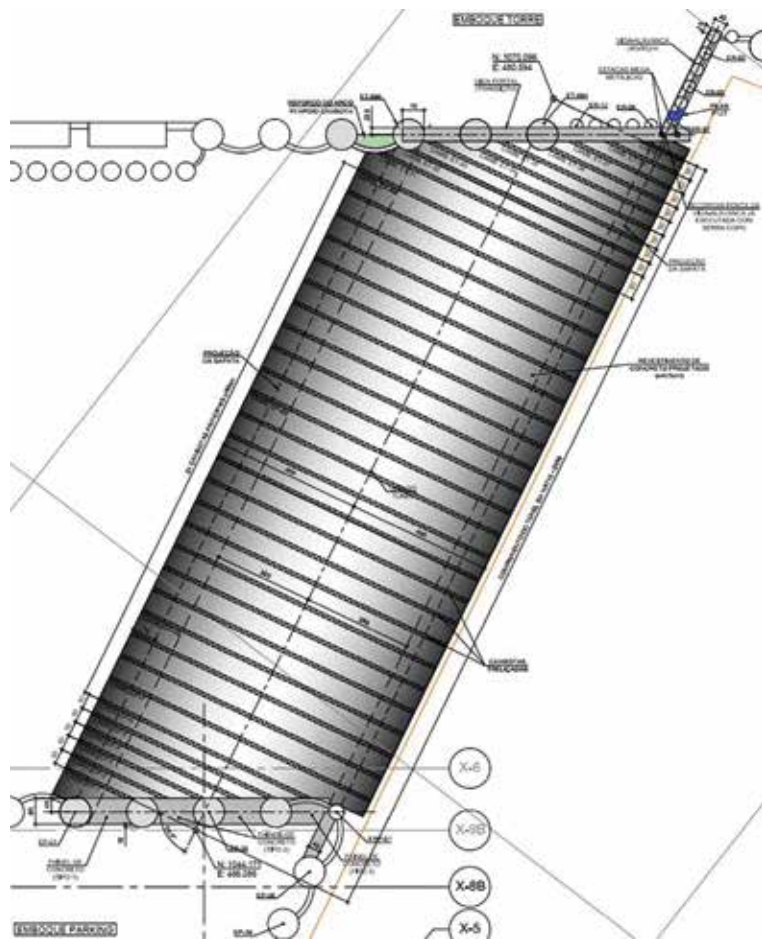
A Figura 2 mostra a seção típica adotada para o túnel, sua posição relativa à geometria do terreno e o subsolo obtido a partir das sondagens de investigação.

É possível notar que o túnel possui uma geometria curvilínea ovalizada, com cerca de 5,4m de altura e 7,9m de largura (medidas em relação ao eixo do revestimento), projetada não apenas para comportar duas faixas de



▶ **Figura 2**
Corte mostrando o subsolo e as geometrias do túnel e do terreno





► **Figura 3**
Implantação do túnel do N-04 da Cidade Matarazzo

circulação de veículos e um passeio para pedestres, mas também para garantir que o revestimento trabalhe primordialmente à compressão.

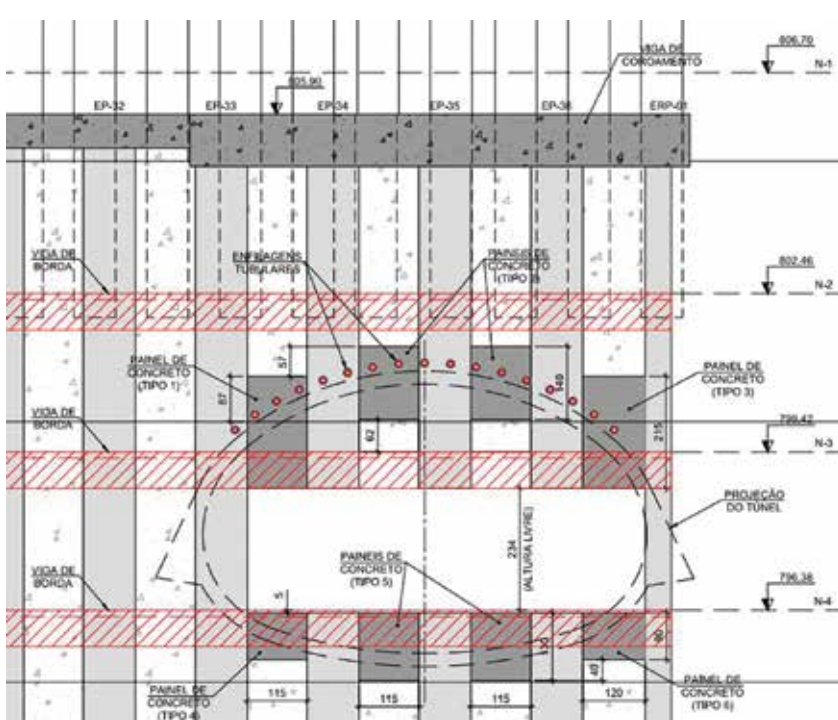
Em planta, o túnel em questão possui cerca de 24m de extensão, com emboques esconsos às paredes de contenção dos setores Torre e Parking, o que pode ser observado na Figura 3.

3. EXECUÇÃO DOS EMBOQUES

Diferentemente de túneis executados em espaço aberto, onde as embocaduras usualmente demandam vigas portais dimensionadas para suportar pequenos carregamentos verticais, o túnel em questão demandou estruturas mais complexas e robustas nos emboques, tendo em vista a existência de paredes de contenção previamente executadas, a ocorrência de elevadas cargas verticais advindas das lajes construídas acima do nível N-04 e os carregamentos provenientes do trecho esconso do revestimento de concreto projetado.

No emboque lado Parking, onde foi possível executar a parede de contenção conforme concepção original do projeto, a solução consistiu em:

- Uma viga de transição executada no topo da contenção (a qual consistia em estações de 100cm de diâmetro espaçadas a cada ~2,15m na região do emboque), dimensionada para suspender as cargas verticais dos estacões que seriam cortados quando da execução do túnel e transferi-las para as estacas adjacentes, as quais foram devidamente projetadas para suportar este acréscimo de carga vertical;
- Painéis de concreto armado executados entre os estacões, os quais foram dimensionados para receber os esforços provenientes do trecho



► **Figura 4**
Vista frontal do emboque lado Parking

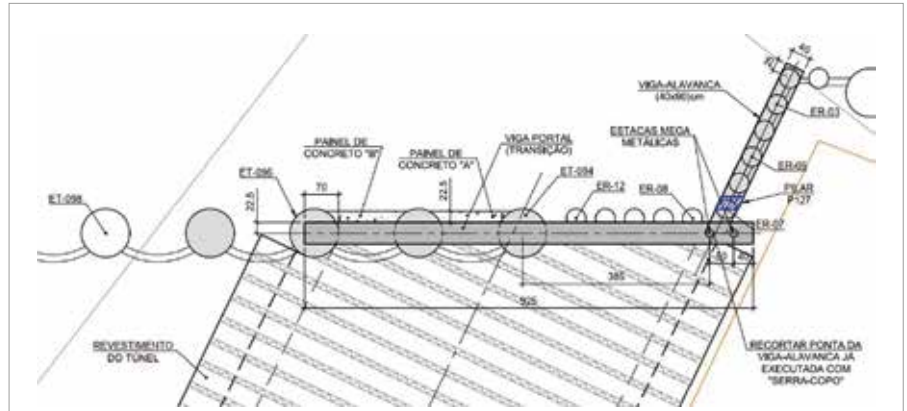
esconso do revestimento do túnel e transferi-los para os elementos verticais da contenção, que, por sua vez, são travados horizontalmente pelas lajes dos subsolos.

A Figura 4 ilustra as estruturas construídas para viabilizar o emboque do túnel pelo lado Parking.

No emboque lado Torre, por outro lado, não foi possível adotar solução semelhante, uma vez que interferências remanescentes de uma antiga edificação demolida impediram a execução de estacas de contenção na lateral do mesmo (trecho adjacente à divisa do terreno). Dessa forma, a escavação nesse canto foi feita com a técnica de solo grampeado, o que permitiu a concomitante remoção das interferências existentes. Em seguida, após a escavação atingir cerca de 10m de profundidade (cota ~800,50m), foram executadas estacas-raiz de 400mm de diâmetro, espaçadas a cada 60cm, para conformarem o complemento da contenção da Torre e permitir que a escavação do referido setor prosseguisse, com maior agilidade e segurança, até a cota final de projeto. A Figura 5 mostra como ficou a contenção no trecho em questão (a partir da cota ~800,50m).

Em função das condições mencionadas, a viga de transição para permitir o corte dos estacões no trecho de emboque do túnel teria de ser implantada pouco acima da cota de topo da contenção de estacas-raiz, de modo a aproveitá-las como elementos de fundação. Para tal, o projeto previu a criação de uma viga-alavanca sobre as estacas-raiz da contenção lateral, paralela ao túnel (Figura 5), com capacidade para suportar uma carga vertical máxima de 70tf, estimada como suficiente naquela etapa do projeto.

Entretanto, mudanças no projeto



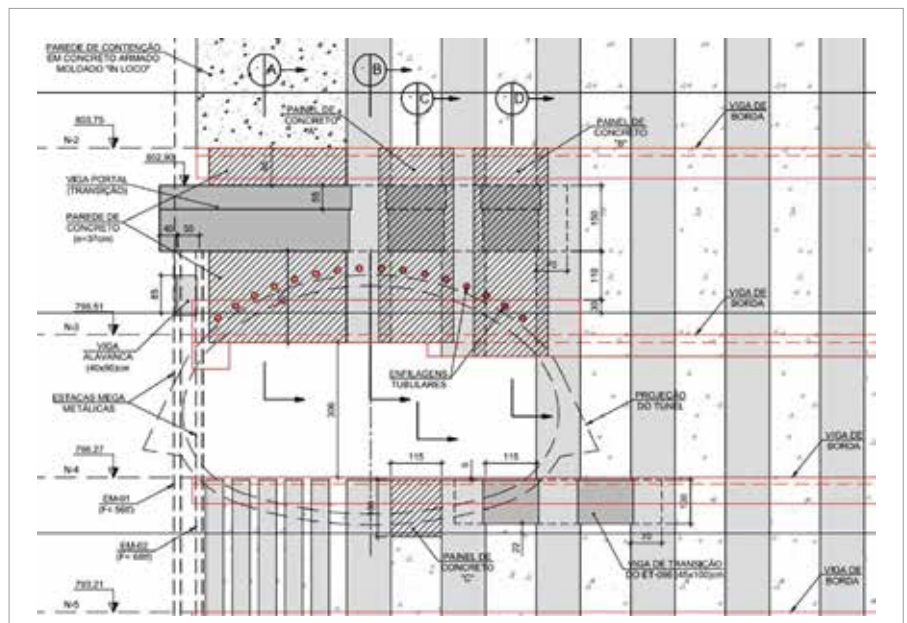
► **Figura 5**
Vista em planta do emboque lado Torre

arquitetônico, ocorridas na fase final de escavação da Torre, implicaram um considerável aumento no carregamento vertical dos estacões da região de emboque do túnel, inviabilizando a solução de apoio sobre a contenção de estacas-raiz inicialmente concebida. Devido ao espaço restrito e à inacessibilidade de equipamentos para execução de novas estacas, a solução encontrada para contornar o problema e prover à

viga portal de transição a capacidade de suporte necessária foi o emprego de duas estacas-mega metálicas.

A Figura 6 mostra todas as estruturas que foram construídas para viabilizar o emboque lado Torre.

É possível notar que a viga portal teve que atravessar os estacões que seriam cortados, justamente no eixo da contenção, para que pudesse receber as elevadas cargas verticais de maneira



► **Figura 6**
Vista frontal do emboque lado Torre





Foto 1 – Recortes nos estacões para execução da viga portal (feitos com serra-copo)

direta, sem que essas causassem esforços indesejados de torção.

Além da viga portal de transição, também foram executados painéis de concreto armado, para receber as cargas advindas da casca do túnel e garantir o travamento horizontal do conjunto como um todo, bem como uma segun-

da viga de transição (no nível da laje do N-04), para distribuir parte da carga vertical do estacão lateral ao túnel (estacão de apoio da viga portal) para as estacas adjacentes e, assim, não exceder sua capacidade de fundação.

Somente 28 dias após a completa concretagem da viga portal de transi-

ção permitiu-se o início da execução das estacas-mega, uma vez que as mesmas utilizariam a própria viga como elemento de reação.

As fotos 1 a 4 mostram algumas das etapas construtiva do emboque.

Ressalta-se que, nas etapas de corte dos estacões, isto é, momento no qual as estruturas de transição efetivamente entraram em carga, foram realizados monitoramentos dos deslocamentos verticais com o auxílio de marcos reflexivos, os quais se mostraram pequenos e compatíveis com deformações elásticas das vigas.

4. EXECUÇÃO DO TÚNEL

4.1 Condicionantes construtivas

Conforme mencionado, o maciço argiloso e a ausência de NA foram condicionantes favoráveis à execução do túnel em questão, pois implicaram a minimização da necessidade de tratamentos de solo. Além disso, como também não houve necessi-



Foto 2 – Armadura da viga portal devidamente instalada



Foto 3 – Execução de estaca-mega metálica reagindo contra a viga portal já executada



Foto 4 – Desvinculação dos estações e demolição da contenção para conclusão do emboque lado Torre

dade de instalação de dispositivos para controle e rebaixamento interno do NA, a execução do túnel teve boa produtividade, a qual poderia ter sido relativamente superior, não fosse o principal fator limitante da obra em questão: a logística de escavação e retirada de terra.

As profundas escavações dos setores Torre e Parking (da ordem de 28m) demandaram de quatro a cinco linhas de tirantes provisórios para ancoragem das paredes de contenção. Dessa forma, seria muito complicado executar o túnel de interligação em meio a tantos tirantes ativos, principalmente por conta de sua escandidez em relação às contenções. Ademais, a execução do túnel concomitantemente à escavação do setor Parking, por exemplo, demandaria a criação de um acesso provisório independente, tendo em vista o desnível final de quatro subsolos entre os planos de trabalho.

Com base nas dificuldades acima citadas, cuja resolução certamente oneraria a obra do túnel e, levando-

-se em conta que a mesma não era caminho crítico do empreendimento, optou-se por aguardar o completo travamento horizontal das paredes de contenção por parte das lajes dos subsolos, o que permitiria o total desligamento dos tirantes provisórios na região de interesse.

Dessa forma, a obra do túnel somente foi iniciada após a execução das lajes dos oito níveis de subsolo, tanto da Torre quanto do Parking, o que implicou as seguintes condicionantes construtivas:

- i. O acesso de equipamentos para escavação e execução do túnel foi limitado pelo pé-direito livre dos subsolos (2,40m de altura), o que somente permitiu a utilização de equipamentos de pequeno porte;
- ii. As lajes dos subsolos foram dimensionadas para sobrecargas usuais de garagem, da ordem de 400 kgf/m², o que limitou a estocagem de materiais e da terra escavada;
- iii. Um longo percurso, via lajes dos subsolos, até a rua, o que, somado à limitação de pé-direito, resultaria em baixa capacidade de transporte e remoção da terra escavada. Para amenizar um pouco tal situação (bem como controlar a sujeira de terra sobre as lajes), a obra utilizou uma pequena



Foto 5 – Mini-retroexcavadeira trabalhando no interior do túnel



Foto 6 – Caçamba utilizada no transporte vertical

caçamba vertical para retirar a terra através de um vazio lateral ao emboque lado Parking.

Portanto, por mais que as condicionantes do maciço fossem fa-

voráveis, a produtividade da obra foi ditada pelas capacidades de escavação e remoção de terra. Ainda assim, a obra de escavação e execução do túnel em questão du-

rou apenas 12 semanas (cerca de 72 dias úteis), o que representou um avanço médio de $39/72 = 0,54$ cambotas/dia (índice usual de medição de produtividade em túneis), tendo sido concluída totalmente dentro do cronograma estipulado.

As Fotos 5 e 6 mostram, respectivamente, os equipamentos utilizados na escavação do túnel (miniretroescavadeiras) e a caçamba empregada na retirada da terra do quarto subsolo.

4.2 Seção e seqüência construtiva

A Figura 7 mostra a seção típica projetada para o túnel de interligação entre os setores Torre e Parking.

De maneira sucinta, a seção projetada possui volume teórico de escavação da ordem de $38\text{m}^3/\text{m}$ e revestimento de concreto projetado com 25cm de espessura média (excetuando-se os engrossamentos na região das sapatas laterais), totalizando um consumo de cerca de $6,3\text{m}^3/\text{m}$.

Em termos de parcialização da escavação, as dimensões do túnel e as condições do maciço permitiram que a mesma ocorresse em duas etapas:

- ▶ **Etapa 1:** escavação plena da região da calota, com manutenção de um núcleo central de estabilidade;
- ▶ **Etapa 2:** Escavação do arco invertido.

A etapa 1 contempla a escavação de toda a porção superior do túnel, limitada pelo plano de trabalho. Nesta etapa, procede-se à instalação da cambota treliçada e à aplicação do revestimento de concreto projetado, formando uma estrutura que funciona como arco.

A etapa 2, por sua vez, contempla a escavação da porção inferior do

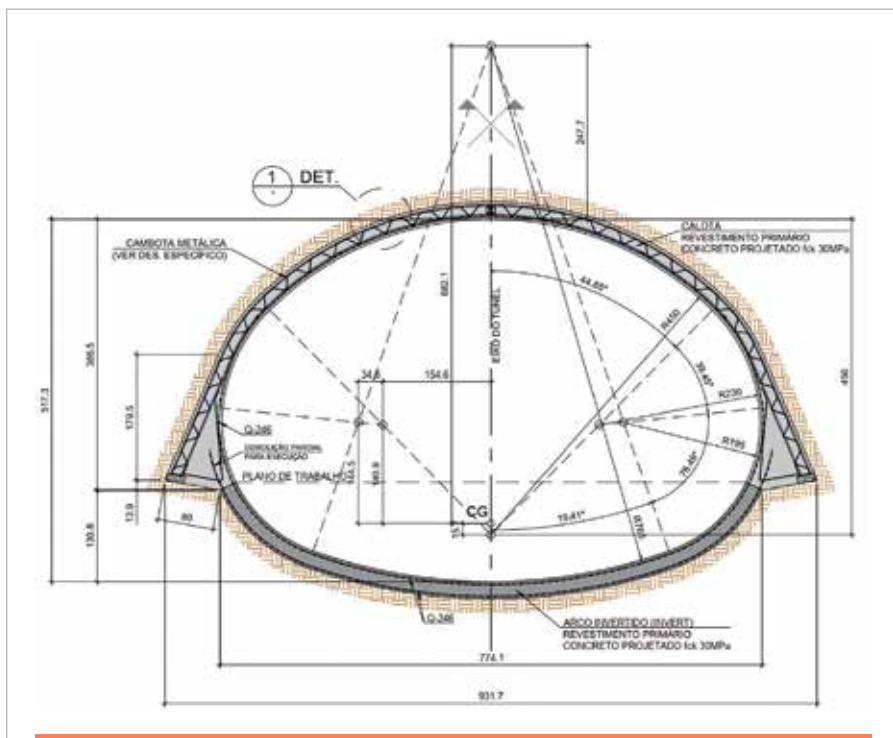
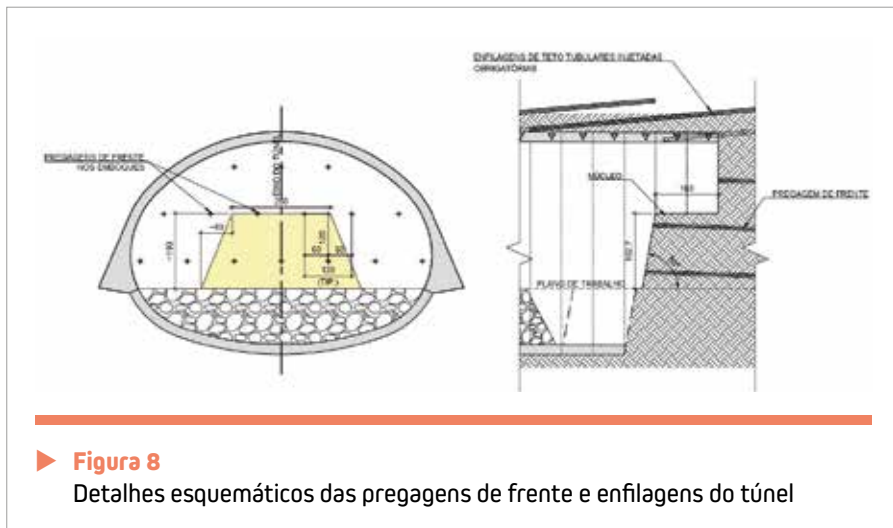


Figura 7
Seção típica do túnel de interligação



► **Figura 8**
Detalhes esquemáticos das pregagens de frente e enfilagens do túnel

túnel, seguida da execução do restante do revestimento de concreto projetado (reforçado com telas eletrossoldadas no trecho de arco invertido).

Se o terreno de cobertura do túnel não fosse desnivelado, isto é, se não houvesse carregamentos assimétricos e, conseqüentemente, esforços de flexão devidos à distorção do túnel, as escavações da calota e do arco invertido poderiam ser completamente desconectadas. Em outras palavras, seria possível fazer a escavação da calota por toda a extensão do túnel e, posteriormente, a escavação do arco invertido (ambas em avanços reduzidos).

No entanto, no caso em questão, os cálculos mostraram que o arco invertido deveria ser executado o quanto antes, para que o revestimento pudesse trabalhar como um tubo e, assim, suportar melhor os efeitos da distorção.

Em relação aos tratamentos de solo, foram adotadas as seguintes soluções:

- Pregagens de frente no emboque lado Parking, para assegurar a estabilidade do maciço no início da escavação do túnel (executadas, portanto, antes da demolição da contenção);
- Enfilagens tubulares injetadas com baixa pressão (instaladas sobre a ca-

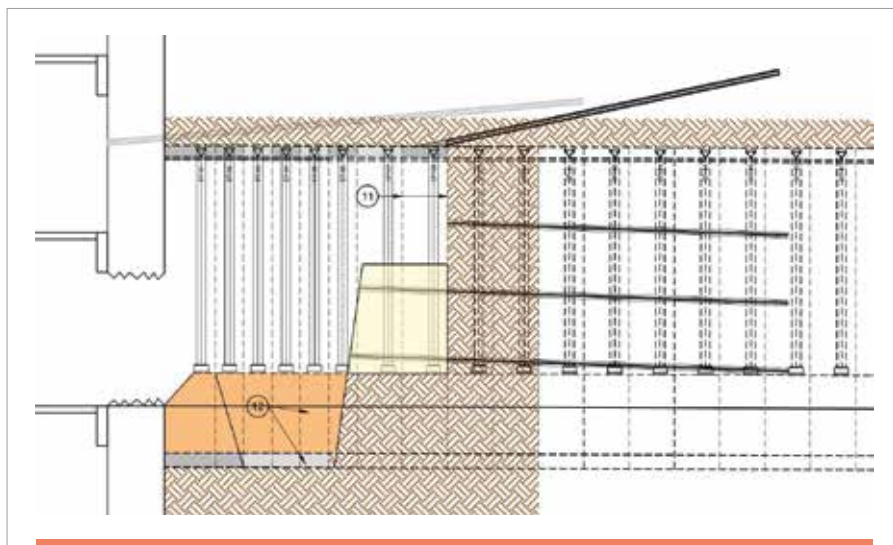
lota, em lances), para garantir a estabilidade de teto dos avanços (que, no caso, se resumia a evitar deslocamentos de torrões de argila).

A Figura 8 ajuda a entender a funcionalidade tanto das pregagens de frente quanto das enfilagens.

Dessa forma, a seqüência construtiva básica do túnel em questão foi:

- a. Execução das estruturas de emboque;
- b. Execução das pregagens de frente e do primeiro lance de enfilagens no emboque lado Parking;

- c. Demolição da contenção no trecho referente ao emboque do túnel;
- d. Escavação da calota em avanços iniciais de 50cm (deixando um núcleo central), instalação da cambota e execução do revestimento de concreto projetado;
- e. Repetição do item “d” até o trecho onde foi possível executar a calota completa;
- f. Assim que possível, escavação do arco invertido em avanços de 100cm, instalação das telas e execução do revestimento de concreto projetado;
- g. Escavação da calota em avanços de 80cm (deixando um núcleo central), instalação da cambota e execução do revestimento de concreto projetado;
- h. Escavação do arco invertido em avanços de 160cm, instalação das telas e execução do revestimento de concreto projetado;
- i. Repetição dos itens “g” e “h” até o ponto de execução do próximo lance de enfilagens;
- j. Execução das enfilagens de teto;



► **Figura 9**
Seção longitudinal ilustrando o avanço da execução do túnel até a etapa “j”





Foto 7 – Execução das enfilagens

k. Repetição dos itens “g” a “j” até a conclusão do túnel.

As fotos 7 a 10 mostram algumas

das etapas construtivas previamente descritas.

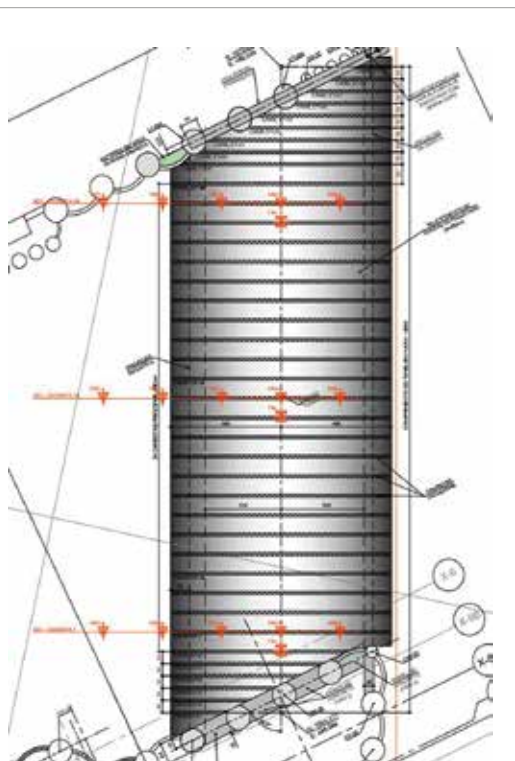
4.3 Instrumentação e monitoramento

Previamente ao início da execução

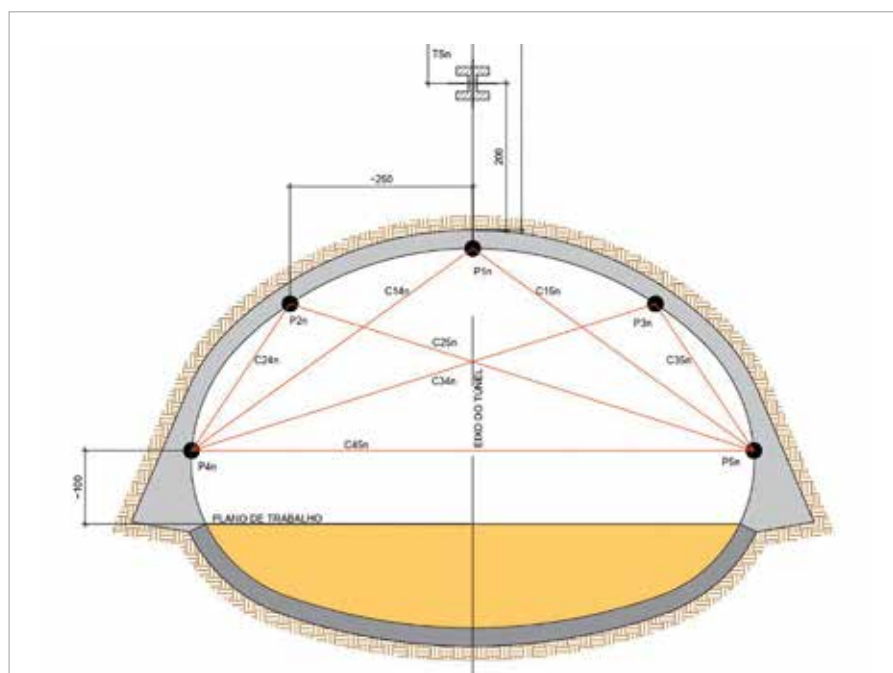
do túnel, foram instalados marcos superficiais e tassômetros sobre a projeção do mesmo, os quais foram utilizados para monitorar os deslocamentos do maciço conforme o avanço das escavações. Basicamente, foram adotadas três seções de instrumentação (Figura 10).

Enquanto os marcos superficiais servem para monitorar os recalques superficiais do terreno, os tassômetros medem os deslocamentos verticais do maciço pouco acima da calota do túnel. Uma vez que o método NATM conta com a resistência ao cisalhamento do maciço, é importante acompanhar as diferenças entre os deslocamentos verticais dos marcos e tassômetros.

Por sua vez, internamente ao túnel, foram instalados cinco pinos de convergência/nivelamento nas mesmas três seções, os quais foram utilizados para monitorar os comprimentos de corda mostrados na Figura 11.



► **Figura 10**
Localização em planta das seções de instrumentação



► **Figura 11**
Pinos de convergência e cordas



Foto 8 – Frente do túnel com núcleo central / revestimento pronto para receber os 5 cm finais de concreto projetado / arco invertido reaterrado



Foto 9 – Execução do arco invertido / frente do túnel



Foto 10 – Revestimento do túnel concluído

Com base nas variações dos comprimentos de corda, é possível verificar os deslocamentos do revestimento do túnel e estimar sua geometria deformada.

5. SÍNTESE

Túneis são ótimas soluções de mobilidade urbana, pois permitem a eliminação de cruzamentos em nível e possuem maior flexibilidade quanto ao traçado geométrico. No caso de túneis executados em NATM, a vantagem é ainda maior, pois trata-se de um método não-destrutivo (MND), o qual tende a causar poucos efeitos na superfície, mesmo durante a fase de obras.

No caso da Cidade Matarazzo, como tentou demonstrar este artigo, um túnel em NATM foi a solução mais viável, tanto em termos executivos quanto econômicos (o custo da obra girou em torno de 100 mil reais por metro linear de túnel e gerou uma economia estimada de 25% em relação à solução de trincheira), para realizar a interligação entre os setores Torre e Parking e, assim, garantir uma operação mais eficiente dos futuros estacionamentos.

6. AGRADECIMENTOS,

Aos engenheiros Mauricio Linn Bianchi, José Rodrigo Tavares, Diego Afonso Barreiros e Éder Luiz Pedrozo, pelo auxílio e pelas informações fornecidas.

Ao engenheiro Luiz Felipe Saes, responsável pelo acompanhamento técnico da obra por parte da Maffei Engenharia.

Às equipes da Telar Engenharia e Comércio, da Tessler Engenharia e da MPD Engenharia, responsáveis pela construção, gerenciamento e controle da obra do túnel. 🏗️

Túnel Paulo Autran

EDUARDO BARROS MILLEN – ENGENHEIRO CIVIL, DIRETOR

ZAMARION E MILLEN CONSULTORES

I. INTRODUÇÃO

O trânsito caótico da cidade de São Paulo não é novidade para ninguém. Os moradores já sabem disso há muito tempo. E os visitantes, constantes ou esporádicos, logo percebem as dificuldades de locomoção devido aos congestionamentos, resultando em atrasos nos compromissos, caso não sejam alertados com antecedência para se programarem.

As novas avenidas, pontes, viadutos e túneis se tornam necessários para tentar compensar o incrível número de veículos que transita e que aumenta anualmente.

A conta matemática é simples, é um problema de escoamento que os engenheiros aprenderam na cadeira de Mecânica dos Fluidos, dos cursos de engenharia, só que neste caso o “fluido” se chama veículo e o “canal” se chama rua. A partir da teoria, sabe-se que a velocidade de escoamento do fluido é proporcional à área destinada, além de outros parâmetros. Em São Paulo, as áreas de determinadas ruas não são suficientes para uma velocidade de escoamento de veículos adequada.

No local onde existe o Túnel Paulo Autran, havia um semáforo para a conversão à esquerda de quem vinha da Avenida Washington Luís, sentido bairro, e pretendia acessar o aeroporto. Muito tempo perdido por causa dos congestionamentos constantes em ambos os sentidos.

O Túnel Paulo Autran foi inaugurado em 25 de janeiro de 2008 e teve como propósito melhorar a fluidez do trânsito

para o acesso da Avenida Washington Luís ao Aeroporto Internacional de Congonhas, na zona sul de São Paulo.



Foto 1 – Antes do túnel (2005)



Foto 2 – Depois do túnel (2008)

Com investimentos de R\$ 23 milhões, a estimativa da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego), na época, era que 1.800 veículos por hora utilizassem a nova via sob a avenida Washington Luís, desafogando o trânsito no entorno do aeroporto, sobretudo em horários de pico.

O novo acesso pôs fim ao farol no cruzamento da Washington Luís. Com isso, a medida, de imediato, trouxe maior fluidez ao tráfego nas Avenidas 23 de maio e Interlagos. Os recursos da obra saíram de uma parceria selada entre a Prefeitura de São Paulo e a Infraero (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária), em novembro de 2005.

2. DESCRIÇÃO DA OBRA

Com 310 metros de comprimento, sendo 160 deles cobertos, 2 pistas com 9,5 m, incluindo uma calçada e gabarito mínimo de 5,0 metros de altura, no sentido Washington Luís/Aeroporto, o espaço para as obras e o prazo necessário eram fatores limitantes que ameaçavam a empreitada. O túnel dá acesso ao estacionamento e ao terminal de passageiros do aeroporto. A passagem tem ainda sistemas de ventilação, iluminação e combate ao incêndio. Assim, o projeto foi concebido de forma pioneira, sendo o primeiro túnel em toda América Latina constituído por estacas-prancha aparentes como solução estrutural para parte da contenção e fundação.

Na execução, aplicou-se o método de trincheira aberta após a cravação das estacas-prancha.

Foram utilizadas placas pré-moldadas de contenção lateral nos trechos de saída e entrada do túnel, assentes sobre canaletas de concreto sobre o solo. O trecho coberto é



Foto 3 — Túnel Paulo Autran – acesso



Foto 4 — Túnel Paulo Autran – interior



Foto 5 — Escavação após a cravação das estacas-prancha, vigas de coroamento das estacas-prancha e vigas pré-moldadas de cobertura

formado por vigas pré-moldadas de concreto armado, posicionadas lado a lado, e apoiadas sobre as vigas de co- roamento das estacas-prancha.



Foto 6 — Montagem das placas pré-moldadas de contenção lateral na entrada e saída do túnel



Foto 7 — Concretagem da capa sobre as vigas de cobertura

A Prefeitura de São Paulo elaborou o projeto básico do túnel e executou desvios de trânsito e sinalização do local, e a Infraero foi responsável pelo projeto e execução do túnel.

3. CRITÉRIOS DO PROJETO ESTRUTURAL

O critério geral adotado no projeto foi de estrutura de concreto pré-moldado, solidarizada no local, de modo a obter continuidade nas ligações conforme normas a seguir, garantindo a qualidade e o atendimento dos requisitos de capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade da estrutura. Principais referências normativas utilizadas para a elaboração deste projeto (normas vigentes na época):

- ▶ ABNT NBR 6118:2003 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- ▶ ABNT NBR 9062:1985 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado - Conceitos da comissão de revisão da ABNT.
- ▶ ABNT NBR 12655:2006 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento;
- ▶ ABNT NBR 7188:1984 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.

Visando aumentar a qualidade do projeto, simultaneamente ao atendimento dos requisitos da ABNT NBR 9062:1985, utilizou-se o texto normativo revisado de 2006, que já estava aprovado pela comissão técnica, mas se encontrava, naquele momento, em consulta pública.

De acordo com as condições de exposição da estrutura, no local de implantação desta, os parâmetros de agressividade do ambiente considerados, foram os da Tabela 1.

As especificações do concreto adotadas na estrutura estão na Tabela 2.

▶ Tabela 1 – Condições de exposição da estrutura

Área	Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
Túnel	III	Forte	Grande
Demais áreas	II	Moderada	Pequeno

► Tabela 2 – Propriedades do concreto

Concreto	Classe de resistência	f_{ck} [MPa]	E_{cs} [GPa]	f_{cj} [MPa]	Relação a/c
Pré-moldado	C35	35	28,1	20	≤ 0,50
Moldado no local (solidarização)	C25	25	23,8	—	≤ 0,55
Moldado no local (pavimento e paredes)	C35	35	28,1	—	≤ 0,50

Para atendimento dos parâmetros de durabilidade, os valores dos cobrimentos nominais das armaduras adotados no projeto foram os da Tabela 3.

Para modelagem desta estrutura foi utilizado o software STRAP 12.0.00, considerando pórtico espacial, composto por elementos estruturais lineares e de superfície, de modo a representar todos os caminhos percorridos pelos esforços até os apoios da estrutura.

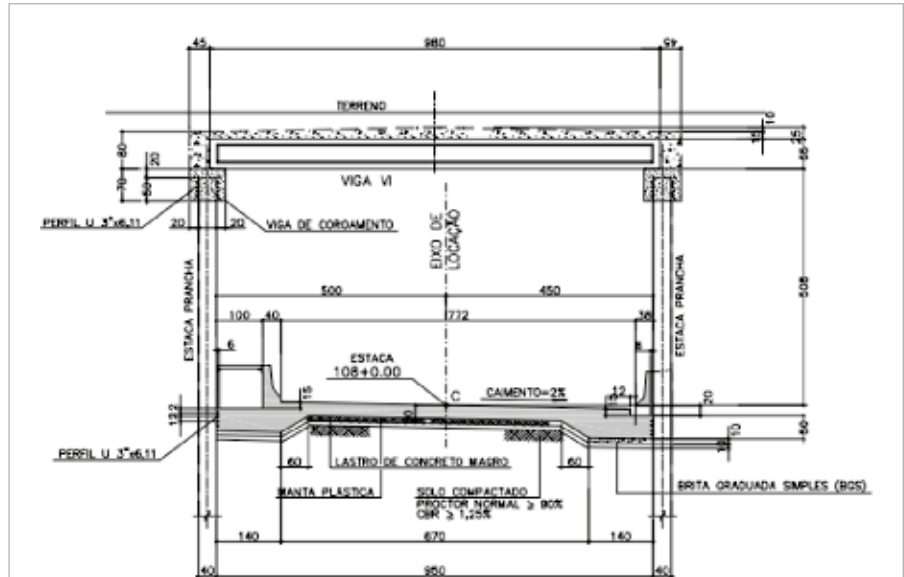
As propriedades dos materiais inseridas no modelo constam na Tabela 2, sendo que, além dessas, também foram consideradas as ações produzidas pelo peso desses materiais (Tabela 4).

Conforme ABNT NBR 6118:2003, a variação da temperatura da estrutura é considerada uniforme quando causada globalmente pela variação da temperatura da atmosfera e pela insolação direta, sendo que ela depende do local de implantação do empreendimento e de suas respectivas características.

Neste projeto, a ação da variação de temperatura foi considerada de + 15 °C ou -15 °C e retração do concreto como um esforço equivalente de temperatura de - 10 °C.

Devido ao tipo de obra, foi considerado o empuxo do solo com coeficiente de recalque de 1,5 kgf/cm³ e coeficiente de empuxo passivo de 0,33, assim como a subpressão, no ponto mais baixo, com 2 m de coluna d'água.

Para os leitos carroçáveis, conforme ABNT NBR 7188:1984, o trem-tipo adotado foi o TB45, com fator de impacto de 1,33 e, para demais áreas, foi adotada uma sobrecarga de 3,00 kN/m².



► Figura 1
Corte transversal da estrutura

► Tabela 3 – Parâmetros de durabilidade do concreto

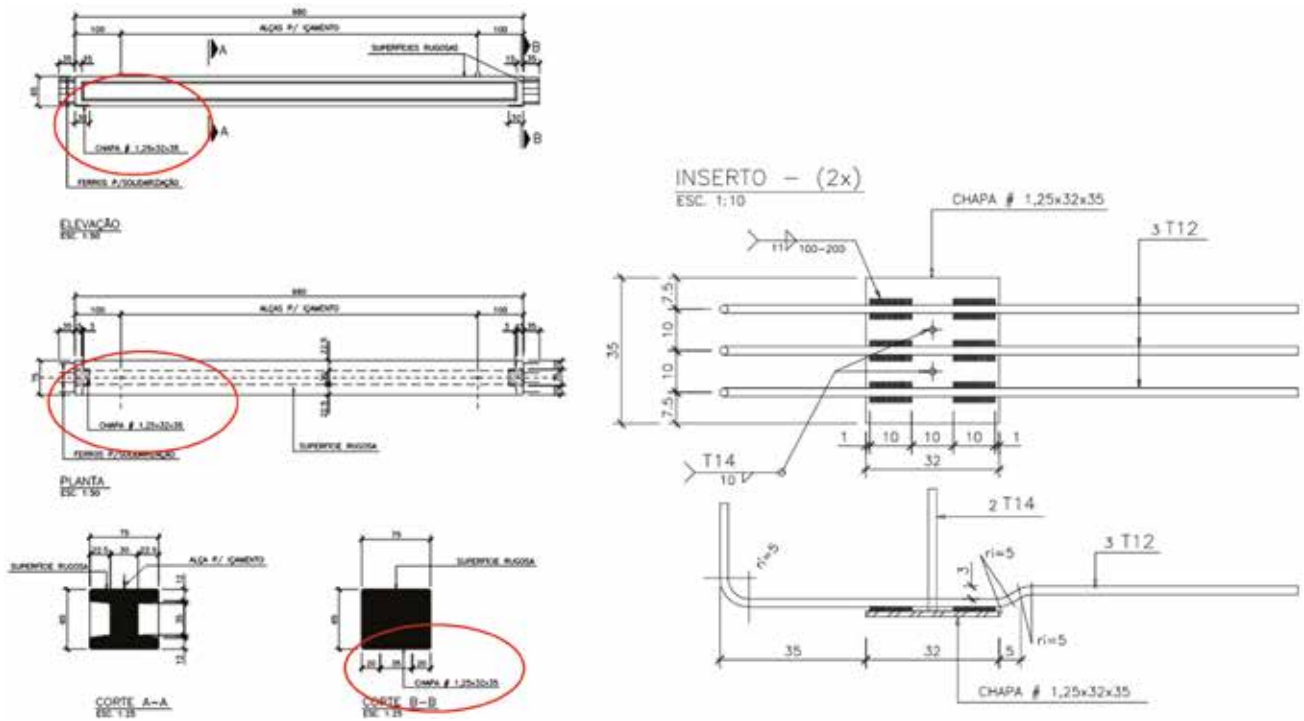
Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Cobrimento de projeto [mm] ($\Delta c = 5$ mm)
Concreto pré-moldado*	Vigas e placas – faces expostas	35
	Vigas e placas – faces capeadas	20
Concreto moldado no local*	Capeamento	30
	Solidarização	35
	Laje do pavimento – face superior	50
	Laje do pavimento – face inferior	35

* Adotado redução de 5 mm para elementos pré-moldados.

► Tabela 4 – Peso específico aparente dos materiais

Material	Intensidade [kN/m ³]
Concreto armado e protendido	25
Argamassa (revestimentos)	20
Água	10
Solo	18
Aço	78,5





► **Figura 2**

Desenho da viga VI de cobertura com destaques para a chapa de solidarização e detalhamento da chapa

4. PROJETO ESTRUTURAL

A característica principal do projeto foi transformar as peças pré-moldadas isostáticas em um sistema estrutural rígido, por meio de ligações contínuas.

As vigas pré-moldadas da cobertura foram solidarizadas às vigas de co-

ramento através de ferros de espera nas extremidades e chapas soldadas, conforme Figura 2.

As placas pré-moldadas de contenção do solo, localizadas nos trechos de entrada e saída do túnel, foram primeiramente posicionadas e depois solda-

rizadas, por meio de concretagens, ao longo da canaleta de fundação. A Figura 3 mostra um corte transversal da estrutura, com destaque para a região de ligação entre os elementos.

Obteve-se, então, um pórtico espacial contínuo, com distribuição de todos os esforços envolvidos por meio de ligações rígidas entre elementos pré-moldados e moldados no local (Figura 4).

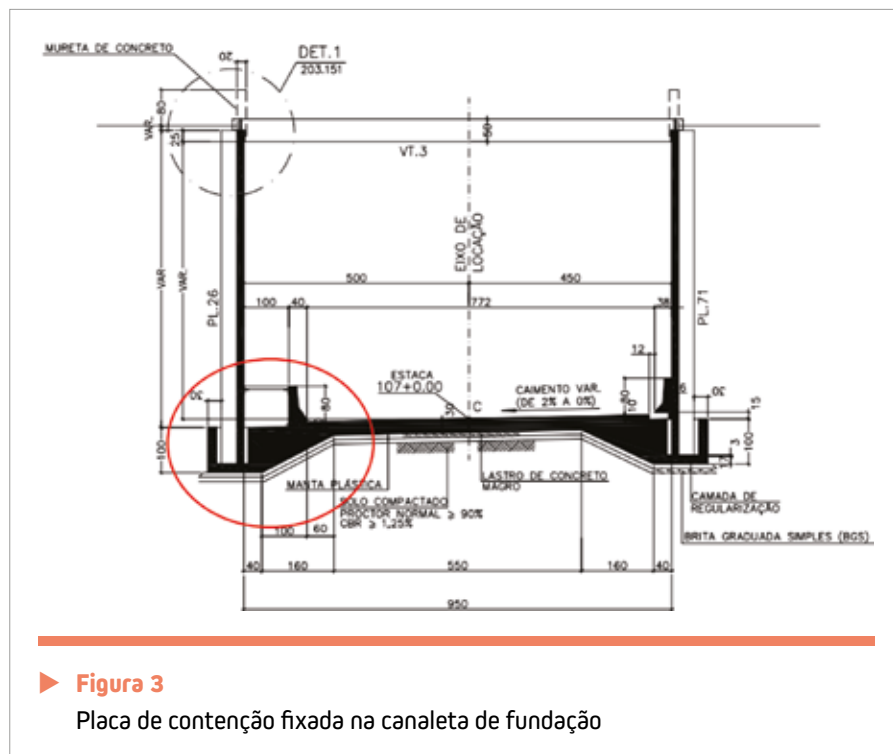
5. PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS

Em função das dificuldades do tráfego no entorno da obra, optou-se por pré-moldar os elementos, ao invés da pré-fabricação em usina, sendo assim, tanto as vigas como as placas foram produzidas no próprio local da obra.

Para que a produção desses elementos fosse feita de forma adequada, garantindo a alta qualidade e condições apropriadas para a estocagem das peças, foi necessário um preparo cuidadoso do terreno.

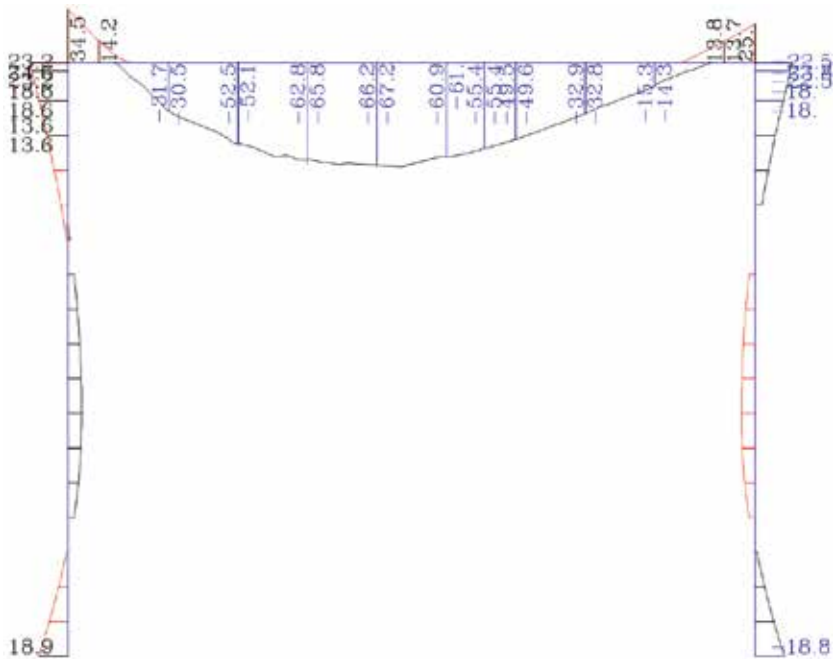
6. COMENTÁRIOS FINAIS

O principal desafio para a execução



► **Figura 3**

Placa de contenção fixada na canaleta de fundação



▶ **Figura 4**

Diagrama de momento fletor para uma das combinações de ações (tf.m)


da obra do Túnel Paulo Autran foi a definição da logística dos trabalhos, devido às condições locais de tráfego, fluxo de pessoas e impossibilidade de interdições, exigindo uma coordenada ação dos profissionais envolvidos ao longo de todo o processo.

As soluções adotadas em projeto, na produção, na estocagem e na montagem dos elementos pré-moldados, assim como as concretagens locais e acabamentos, foram intensamente estudadas de forma multidisciplinar, visando minimizar o tempo total da obra.

Desde o início do detalhamento do projeto até a inauguração da obra foram 16 meses de intenso trabalho, podendo ser considerado um intervalo de tempo muito curto em função da complexidade dos serviços e condições envolvidas.

A solução estrutural em elementos pré-moldados teve um papel predominante na obtenção do sucesso deste empreendimento, cabendo destacar, entre tantas outras vantagens, a alta qualidade alcançada no acabamento dos elementos estruturais e a redução significativa dos prazos de obra.

Outro aspecto positivo foi a forma pioneira de projetar um túnel, utilizando estacas-prancha aparentes para a contenção lateral do solo. Esta solução, além de prática na execução e com baixo custo, possibilitou gerar um alto valor para a obra.

Enfim, o engenheiro deve atualizar seus conhecimentos de forma permanente, a fim de encontrar soluções estruturais inovadoras e desafiadoras, que atendam aos requisitos normativos e utilizem as vantagens e versatilidade dos elementos estruturais envolvidos, sejam esses metálicos ou em concreto. 

EQUIPE TÉCNICA

PLANSERVI

Gerenciamento e projetos complementares

ZAMARION E MILLEN CONSULTORES

Projeto estrutural de concreto pré-moldado e moldado no local (pavimento inferior e capeamento).

BOC

Pré-fabricados

CAMARGO CORRÊA

Montagem e obras civis



Foto 8 — Etapa final de cura úmida do concreto



O *best seller* da engenharia de materiais de construção não pode faltar na sua biblioteca!



IBRACON



Ficha Técnica

ISBN / ISSN: 978-85-98576-27-5
Edição: 3ª edição
Páginas: 1760
Formato: 18,6 x 23,3 cm
Acabamento: Capa Dura
Ano de Publicação: 2017
Peso: 6,5 Kg

O livro “Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais” é a mais completa fonte de consulta para estudantes, professores e profissionais da engenharia.

Dividido em dois volumes, o livro é composto por 52 capítulos escritos por 86 reconhecidos especialistas brasileiros, totalmente referenciado nas normas brasileiras vigentes e de acordo com as práticas nacionais da mais alta qualidade da engenharia civil em vigor.

Garanta seus exemplares!
Acesse a Loja Virtual do IBRACON
www.ibracon.org.br

Estudo IPT de concreto com idades avançadas: histórico e aspectos gerais

KAROLINE MARIANA GONÇALVES FREITAS – ASSISTENTE DE PESQUISA | PRISCILA RODRIGUES MELO LEAL – PESQUISADORA

FABIANO FERREIRA CHOTOLI – PESQUISADOR | VALDECIR ANGELO QUARCIONI – PESQUISADOR

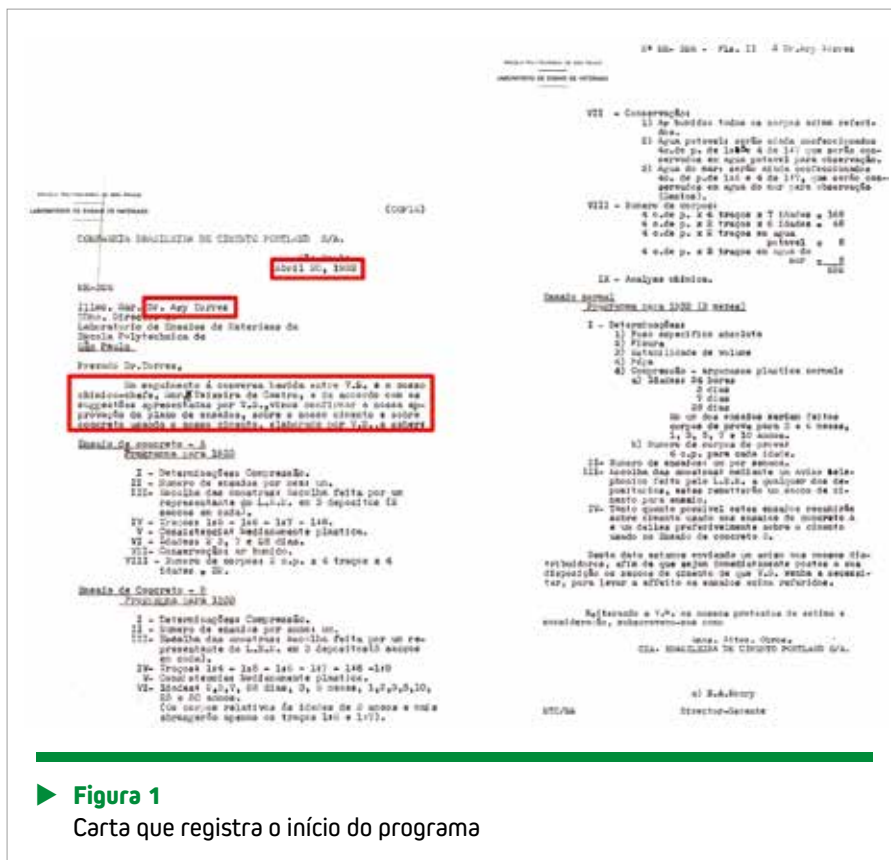
INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT)

I. INTRODUÇÃO

Logo após a instalação da Escola Politécnica, em 1894, no bairro do Bom Retiro, em São Paulo, foi constatada a necessidade e a importância de inserir a parte prática e experimental do curso de engenharia civil, e foi nesse contexto que, em 1899, foi criado o Gabinete de Resistência dos Materiais (GRM) da Escola Politécnica de São Paulo, sendo um dos primeiros laboratórios do gênero no país.

Em 1923, Ary Frederico Torres se graduou no curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica. Como obteve o primeiro lugar entre os formandos do ano, ganhou, como prêmio, uma viagem de estudos à Europa, para onde embarcou em 1925. Em Zurique, na Suíça, trabalhou por quase um ano como assistente no Laboratório Federal de Ensaio de Materiais e, além disso, visitou os laboratórios de pesquisas técnicas da França, Alemanha, Áustria, Itália e Bélgica.

Com a bagagem que adquiriu no exterior, Ary Torres, de volta à São Paulo, em 1926, assumiu a direção do GRM e apresentou um relatório e um projeto de remodelação do Gabinete, que passou a ser chamado de



► **Figura 1**
Carta que registra o início do programa

Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM). Nesse projeto foram propostas algumas mudanças que foram fundamentais para o crescimento do laboratório (Boletim do IPT nº 20, 1939).

Nesse mesmo ano, a primeira fábrica moderna de cimento, a Companhia de Cimento Portland Perus, iniciou a sua produção em São Paulo.

Já com uma seção dedicada ao estudo do concreto e materiais constituintes, Ary Torres publicou, em 1927, o Boletim nº 1 do IPT sobre “Dosagem dos concretos”, tornando público o resultado de um ano de estudos experimentais, que causou grande repercussão na época, visto que os concretos eram dosados até



então de forma empírica, sem fundamento técnico, com base apenas em traços tradicionais ou arbitrários.

Com o método proposto para dosagem racional dos concretos, tornou-se possível alcançar as resistências previstas nos projetos, com a produção de um concreto mais econômico e de qualidade, o que trouxe contribuição significativa para o desenvolvimento tecnológico dos concretos nacionais (Boletim do IPT nº 03, 1929).

Em 1933, Ary Torres iniciou o programa intitulado “Estudo de Dosagem de Concreto de Longa Duração”, que consistia em um plano de ensaios para cimento e concreto, que representava a caracterização das amostras de cimento e a moldagem de corpos de prova de concreto de diferentes traços para a determinação da resistência à compressão de 2 dias até 50 anos de idade.

O documento que registra o início do programa é uma carta encaminhada ao engenheiro Ary Torres, datada de 20 de abril de 1933, pelo então diretor gerente da Companhia de Cimento Portland Perus, H.A. Henry, em que é aprovado o plano de ensaios proposto pelo LEM (Figura 1).

Em outra carta com mesma data e remetente, foram tratados os custos dos ensaios e enfatizada a finalidade do estudo, a saber: oferecer comparações sob o ponto de vista de durabilidade do concreto exposto ao ar, água simples e água do mar.

Em 19 de agosto de 1933, foi emitido o primeiro documento técnico a respeito do programa, o “Ensaio Oficial nº 3931”. Nesse documento são relatadas as séries de corpos de prova, os materiais empregados, as características de dosagem dos con-

cretos e os resultados de resistência à compressão até 28 dias.

No ano seguinte, o Laboratório de Ensaios de Materiais foi transformado em Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, por meio do Decreto nº 6375 de 3 de abril de 1934.

Em 1935, foram moldados os corpos de prova da segunda amostra do programa de “Estudo de Dosagem de Concreto de Longa Duração”, e nos anos subsequentes, foram realizadas as moldagens das outras 73 amostras.

Em 1936, por iniciativa de um grupo de industriais dedicados à produção de cimento Portland foi criada a ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, sendo que Ary Torres foi nomeado seu diretor-geral, que, anos depois, se tornou o cargo de diretor-presidente.

Em 1937, Ary Torres e o engenheiro Paulo Sá, do Laboratório de Ensaios de Materiais do Instituto Nacional de Tecnologia, coordenaram a 1ª Reunião de Laboratórios de Ensaios de Materiais, na qual foi formulada a proposta de constituição de uma entidade nacional de normalização. E, então, em 1940, foi fundada a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2011). Nessa ocasião, Ary Torres deixou a superintendência do IPT para assumir como o primeiro presidente da ABNT.

Dessa forma, as especificações e métodos de ensaio desenvolvidos nesse período no IPT serviram de base para a elaboração das primeiras normas da ABNT, como a NB1 – Cálculo e Execução de Obras de Concreto, e a MB-1 – Método de ensaio de cimento Portland (ABNT, 2011).

Em 1965, foram finalizadas as moldagens do programa “Estudo de Dosagem de Concreto de Longa Duração”, com a previsão do término dos ensaios em 2015.

Em 1990, após 57 anos do início do programa, o pesquisador do Laboratório de Concreto do IPT, Carlos Eduardo de Siqueira Tango, apresentou a sua tese de doutorado, sob orientação do Professor Dr. Vahan Agopyan, intitulada “Um estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento Portland até 50 anos de idade”, na qual reuniu os dados do estudo iniciado por Ary Torres. No trabalho desenvolvido por Tango foi apresentada a dedução de modelos matemáticos da evolução da resistência à compressão com o tempo, confrontados com os dados disponíveis do programa, obtendo, com isso, um método de previsão de resistências por modelagem matemática (TANGO, 1991).

Atualmente, o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT, como responsável por finalizar o programa iniciado por Ary Torres, ainda possui corpos de prova acondicionados na câmara úmida do IPT, onde os exemplares permaneceram desde que foram moldados.

Em 2019, foi finalizado o levantamento de toda a documentação do programa e do acervo de corpos de prova restantes do estudo. Foram localizados 422 corpos de prova, alguns íntegros e outros já ensaiados, que não perderam a sua identificação e que resistiram ao tempo e às mudanças que ocorreram ao longo dos anos, inclusive 12 corpos de prova da primeira amostra moldada em 1933.

Cabe ressaltar que os 12 corpos de prova restantes da primeira

amostra foram moldados inicialmente com a finalidade de serem submetidos à conservação em água do mar, o que não ocorreu; em contrapartida, isto permitiu um momento histórico: a análise da resistência do concreto com 86 anos de idade.

Após o levantamento realizado, foram selecionados cuidadosamente alguns corpos de prova para serem estudados – inicialmente, suas propriedades mecânicas como proposto no programa, e posteriormente, sua microestrutura por meio de novas tecnologias.

O presente artigo tem como objetivo trazer informações do contexto histórico no qual está inserido o programa e compartilhar a parte experimental desenvolvida pelo ilustre Dr. Ary Torres, assim como divulgar alguns resultados obtidos recentemente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Programa experimental

As moldagens dos corpos de prova desse estudo foram realizadas durante 32 anos (1933 a 1965). Nesse período foram analisadas cinco marcas diferentes de cimento, a saber: Cimento Perus, Votoran, Santa Rita, Itaú e Maringá, que totalizaram 75 amostras de cimento.

Para cada amostra de cimento foram moldados corpos de prova de concreto para o estudo da resistência à compressão de 2 dias até 50 anos de idade. As últimas moldagens foram em 1965. Portanto, os últimos ensaios estavam previstos para serem realizados no ano de 2015.

A Companhia Brasileira de Cimento Perus foi a primeira a entrar no

programa, seguida da Fábrica Votorantim, em 1937, da Cimento Itaú, em 1939, da Cimento Maringá, em 1956, e da Cimento Santa Rita, em 1957.

Das 75 amostras estudadas, foram 33 amostras de cimento Perus, 27 amostras de cimento Votoran, 4 amostras de cimento Itaú, 2 amostras de cimento Maringá e 9 amostras de cimento Santa Rita.

As amostras de cimento eram coletadas por representantes do Laboratório de Concreto do IPT em depósitos de fornecedores ou dos próprios fabricantes, eram devidamente identificadas e caracterizadas através de ensaios físicos, mecânico e químicos - finura, consistência normal, tempo de pega, estabilidade de volume, resistência à compressão e análise química.

Os agregados utilizados nas mol-



Criação do Gabinete de Resistência dos Materiais (GRM) pelo Dr. Antônio Francisco de Paula Souza.



Início o Programa intitulado “Estudo de dosagem de concreto de longa duração”, elaborado por Ary Torres.



É fundada a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e as primeiras normas de cimento e concreto são publicadas.

1899

1926

Ary Torres assume a direção do GRM, que passa a ser chamado de Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM).



A primeira fábrica de cimento de cimento *Companhia de Cimento Portland Perus* inicia a sua produção em São Paulo.

1933

1934

O LEM é transformado em Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).



1936

É fundada a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

1940

1944

O IPT é transferido para a Cidade Universitária.



dagens dos concretos foram todos provenientes do rio Tietê. As proporções relativas entre os agregados, em cada traço de concreto, foram calculadas de modo a se obter um módulo de finura adequado à trabalhabilidade do concreto, sendo o diâmetro máximo de 38 mm e a massa específica de 2,6 kg/dm³.

Os corpos de prova de concreto cilíndricos foram moldados com dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo a consistência medianamente plástica, com o abatimento na faixa de 100±20 mm.

Foram estudados seis traços de concreto, de relações cimento: agregado, em peso, iguais a 1:4 – 1:5 – 1:6 – 1:7 – 1:8 e 1:9. E as idades estudadas foram 2, 3, 7, 28 dias; 3, 6, 12 meses; 2, 3, 5, 10, 25 e 50 anos, sendo divididas em série A e série B.

A série A corresponde aos corpos de prova para as idades até 12 meses, e a série B corresponde aos de longa duração, ou seja, aos corpos de prova para as idades de 2 a 50 anos.

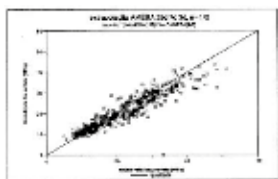
Na proposta inicial, estava definido que seriam moldados corpos de prova também para a série C, com traços de 1:5 – 1:6 – 1:7, que seriam colocados em conservação em água potável para observação durante o estudo, e para a série D, moldados apenas os traços 1:5 – 1:6 – 1:7, que seriam colocados em água do mar para observação durante o estudo. Porém, após o levantamento dos dados das amostras, foi verificado que a moldagem da série C e série D foi realizada apenas nas primeiras amostras nº 3931 e nº 6469.

No primeiro documento do programa, é relatado que os corpos de prova pertencentes à série D seriam enviados para conservação em água do mar de Santos, devendo haver alguma combinação com a Cia. Docas de Santos. Porém, não há mais registro dessa tratativa. Em razão disso, os corpos de prova que seriam destinados à água do mar foram moldados apenas para as duas primeiras amostras, assim como os destinados à água simples, sendo que os corpos de prova da série D da amostra nº 3931 encontram-se no LMCC conservados em câmara úmida até a presente data.

Na maior parte do estudo, as quantidades, traços e número de corpos de prova seguiram o estabelecido no programa inicial, exceto série C e série D, conforme Tabela 1.



São finalizadas as moldagens dos corpos de prova do Programa.



Carlos Eduardo de Siqueira Tango publica sua tese de doutorado com base nos dados disponíveis do Programa.



Levantamento de toda a documentação do Programa. Ruptura de alguns corpos de prova restantes, inclusive 2 da primeira amostra nº 3931 com 86 anos de idade.



1965

1972

No segundo colóquio entre tecnólogos do concreto realizado no IPT, é fundado o Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON).

1990

2015

A última amostra moldada do Programa completa 50 anos.



2019



► Tabela 1 – Quantidades, traços e número de corpos de prova para cada série

Série	A	B	C	D
Conservação	Ar úmido	Ar úmido	Água potável	Imersos em água do mar
Traços em peso cimento: agregado	1:4	–	–	–
	1:5	1:5	1:5	1:5
	1:6	1:6	1:6	1:6
	1:7	1:7	1:7	1:7
	1:8	–	–	–
	1:9	–	–	–
Idades	2, 3, 7 e 28 dias 3, 6 e 12 meses	2, 3, 5, 10, 25 e 50 anos	Uma e indeterminada	Uma e indeterminada
Número de corpos de prova para uma mesma idade	4	4	4	4
Número de corpos de prova para a série	168	72	12	12
Número total de corpos de prova de concreto por amostra de cimento Série A e B	240		ver nota ^{1 2}	

NOTA

¹ Da terceira amostra em diante não foram moldados os corpos de prova para a série C e D.

² Para a segunda amostra do Programa (nº 6469) foram moldados 32 corpos de prova para a série D. Sendo 4 traços 1:4, 1:5, 1:6 e 1:7, e 8 corpos de prova por traço: 4 simples, 2 armados com 1 ferro e 2 armados com 4 ferros – esses corpos de prova não foram encontrados no levantamento realizado.

Foram moldados por amostra de cimento 240 corpos de prova de concreto. Nas duas primeiras amostras foram executadas a série C e série D, mas, nas demais amostras, seguiu-se a programação de moldagem apenas da série A e B. Nos últimos cinco anos de moldagem, a quantidade de corpos de prova moldados por amostra de cimento diminuíram para 120, sendo apenas 2 corpos de prova para a mesma idade.

Pelo levantamento de dados realizado, foram moldados durante todo o Programa 15.674 corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 2.

2.2 Metodologia

A primeira amostra de cimento do programa foi ensaiada de acordo com os métodos propostos em boletins emitidos em 1933, por Ary Torres e Romulo de Lemos Romano (Boletim nº 11: Método para o ensaio mecânico dos cimentos e Boletins nºs 90 e 94: Ensaio normal dos cimentos).

Na elaboração desses métodos, buscou-se seguir o que já estava estabelecido em normas estrangeiras, principalmente na ASTM – American Society for Testing and Materials, com exceção do método proposto para

ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.

Em 1935, após alguns ajustes nos textos, foram publicados os métodos de ensaio para cimento, concreto e agregados e a especificação para cimento, conforme Tabela 3, quando se deu a moldagem da segunda amostra do Programa.

No decorrer dos anos, as normas que descrevem os métodos de ensaio utilizados no programa passaram por algumas mudanças e revisões, e outras normas de cimento, concreto e agregado foram publicadas.

Como exemplo, na época em que foram moldados os corpos de prova, utilizava-se agregado graúdo de dimensões maiores (no programa, foram utilizados agregados de diâmetro máximo 38 mm) e, portanto, só era possível moldar corpos de prova em dimensões maiores, ou seja, no

► Tabela 2 – Quantidades de corpos de prova moldados durante todo o Programa

Série	A	B	C	D
Quantidade de corpos de prova moldados por série	10.936	4.670	24	44
Total de corpos de prova moldados	15.674			



mínimo 15 x 30 cm. Atualmente, são utilizados, para controle em obra, corpos de prova com dimensões menores, como 10 x 20 cm. Isto se deve à premissa normativa da dimensão básica do corpo de prova, que deve ser, no mínimo, três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado do concreto.

Outra mudança importante no decorrer dos anos foi o início da utilização das adições no cimento, que refletiu diretamente nos critérios normativos. Só a partir de 1952 é que se iniciou no Brasil a produção de cimento utilizando adições, com a primeira partida de cimento Portland de Alto Forno. Em 1954, iniciou-se a produção de cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), em 1955, de Cimento Portland Branco (CPB) e, em 1969, de cimento Portland Pozolânico (POZ) (BATTAGIN, MUNHOZ, BATTAGIN, 2015).

Na Tabela 4, são identificadas algumas das normas de cimento Portland, concreto e agregados, e as suas versões atualizadas.

2.3 Resultados

Para cada amostra e fabricante, era emitido um primeiro certificado, contendo o programa experimental proposto, a caracterização dos agregados e os resultados de resistência à compressão dos concretos de até 28 dias de idade. Posteriormente, eram emitidos certificados individuais, com os resultados de resistência à compressão dos concretos das demais idades – 3, 6, 12 meses; 2, 3, 5, 10, 25 e 50 anos. Os certificados com os resultados físicos, mecânico e químicos do cimento eram emitidos separadamente – sendo um

► Tabela 3 – Primeiros métodos e especificação publicados pelo IPT referente a cimento, concreto e agregado

Material	Identificação	Descrição	Ano da publicação
Cimento Portland	E1	Especificação	1935
	M1	Métodos de ensaio	
Concreto	M2	Moldagem e sazonalamento de corpos de prova de concreto	1935
	M3	Ruptura de corpos de prova de concreto	
Agregados	M4	Método para determinação da composição granulométrica de agregados	1936
	M5	Método para a determinação do peso específico aparente de agregados	
	M10	Método para a determinação do índice de matéria orgânica dos agregados finos	

► Tabela 4 – Normas atuais de especificação e caracterização de cimento Portland, concreto e agregados

Material	Identificação	Descrição	Última atualização
Cimento Portland	NBR 16697	Requisitos	2018
	NBR 7215	Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos	2019
	NBR 16606	Determinação da pasta de consistência normal	2018
	NBR 16607	Determinação dos tempos de pega	2018
	NBR 11579	Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)	2013
	NBR 11582	Determinação da expansibilidade de Le Chatelier	2016
Concreto	NBR 5738	Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova	2016
	NBR 5739	Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos	2018
Agregados	NBR NM 248	Determinação da composição granulométrica	2003
	NBR NM 52	Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente	2009
	NBR NM 53	Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água	2009
	NBR NM 49	Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas	2001

► Tabela 5 – Caracterização do cimento utilizado na dosagem do concreto – amostra 3931

	Ensaio	Resultados	
Ensaio	Finura – Peneira 900 malhas/cm ² (%)	0,14	
	Finura – Peneira 4900 malhas/cm ² (%) ¹	6,03	
	Consistência normal (%)	25	
	Pega	1 h 39 min	
	Ensaio	Estabilidade de volume – Antes da ebulição (mm)	–
		Estabilidade de volume – Após 24 horas de ebulição (mm)	3,2
		Resistência à compressão (MPa) – 1 dia	1,7
		Resistência à compressão (MPa) – 3 dias	9,5
		Resistência à compressão (MPa) – 7 dias	17,6
	Ensaio	Resistência à compressão (MPa) – 28 dias	29,9
Perda ao fogo %		1,80	
Insolúvel %		0,08	
Sílica (SiO ₂)		20,65	
Alumina (Al ₂ O ₃)		5,50	
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		1,86	
Cal (CaO)		64,40	
Magnésio (MgO)		6,16	
	Anh Sulfúrico (SO ₃)	0,97	

NOTA

¹ O ensaio de finura da primeira amostra de cimento foi realizado de acordo com o Boletim de ensaios de cimento emitido em 1933. E foi utilizada a peneira de 4900 malhas/cm² (que corresponde a 0,088 mm de abertura). A partir de 1935, foi realizada a substituição da peneira alemã de 0,088 mm, pela peneira americana de 0,075 mm de abertura (nº 200). Segundo Ary Torres (1935) a substituição foi feita por ser uma peneira mais fina, o que permite um resultado melhor dessa característica do cimento. Nessa publicação de 1935, ficou estabelecido o limite para o resíduo na peneira de 0,075 mm, de ≤15% em peso. E foi a partir de 1991 que se estabeleceu o limite de ≤12%, que permanece até hoje.

certificado para os ensaios físicos e mecânicos, e um certificado para os ensaios químicos.

Em 2018 e 2019, o LMCC, como responsável por finalizar esse estudo,

organizou e digitalizou todos os certificados encontrados, e a partir disso, foi elaborada uma ficha para cada amostra e todos os resultados foram tabulados.

Os certificados originais emitidos

com os resultados dos concretos foram encontrados em sua totalidade em posse do LMCC, contendo os dados do programa, os resultados de caracterização dos agregados, e os resultados de resistência à compressão dos concretos nas idades estudadas. Os certificados contendo os resultados de caracterização dos cimentos – físicos, mecânico e químico foram localizados parcialmente.

Foi realizada também a inventariação dos corpos de prova da câmara úmida, e a partir dessas informações, foi feita uma sistematização dos dados encontrados nos relatórios antigos e do inventário.

Esse programa gerou um enorme banco de dados de resultados, que registra décadas da história do cimento e concreto, e abre possibilidade para inúmeros estudos.

Na Tabela 5 constam os resultados dos ensaios físicos, mecânico e químicos da primeira amostra do programa.

Para todas as amostras estudadas foram registradas as informações de dosagem dos concretos, as proporções entre cimento, areia e brita, a relação água/cimento e o consumo de cimento, conforme exemplificado na Tabela 6, na qual constam as informações da primeira amostra do programa.

Conforme o andamento dos ensaios, os resultados de resistência à compressão eram emitidos e enviados para os fabricantes de cimento. E, ao final, era gerado um gráfico dos resultados de longa duração. Na Figura 2, é apresentado o gráfico da primeira amostra nº 3931 – Cimento Perú, até 50 anos de idade, referente aos traços 1:6 e 1:7.

► Tabela 6 – Informações sobre a dosagem da amostra nº 3931

Traços em peso Cimento: Agregado	Módulo do agregado	Traços em peso Cimento: Areia: Brita	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m ³)
1: 4,00	5,60	1: 1,34: 2,66	0,409	442
1: 5,00	5,34	1: 2,00: 3,00	0,478	367
1: 6,00	5,10	1: 2,78: 3,22	0,600	318
1: 7,00	4,90	1: 3,60: 3,40	0,715	282
1: 8,00	4,80	1: 4,30: 3,70	0,835	250
1: 9,00	4,70	1: 5,10: 3,90	1,000	210



Além de todos os resultados emitidos, em 2019 foram selecionados 12 corpos de prova restantes do programa, de mesmo traço (1:6), para serem analisadas, inicialmente suas propriedades mecânicas, como proposto por Ary Torres, e posteriormente, sua microestrutura por meio de novas tecnologias.

As amostras foram escolhidas por década de moldagem, incluindo dois corpos de prova da primeira amostra. Portanto, foram ensaiados corpos de prova de concreto com 86, 77, 65, 56 e 55 anos de idade, momento histórico que reuniu ipeteanos e ex-ipeteanos que trabalharam diretamente no projeto. Os resultados de resistência à compressão são apresentados na Tabela 7 e gráfico da Figura 3.

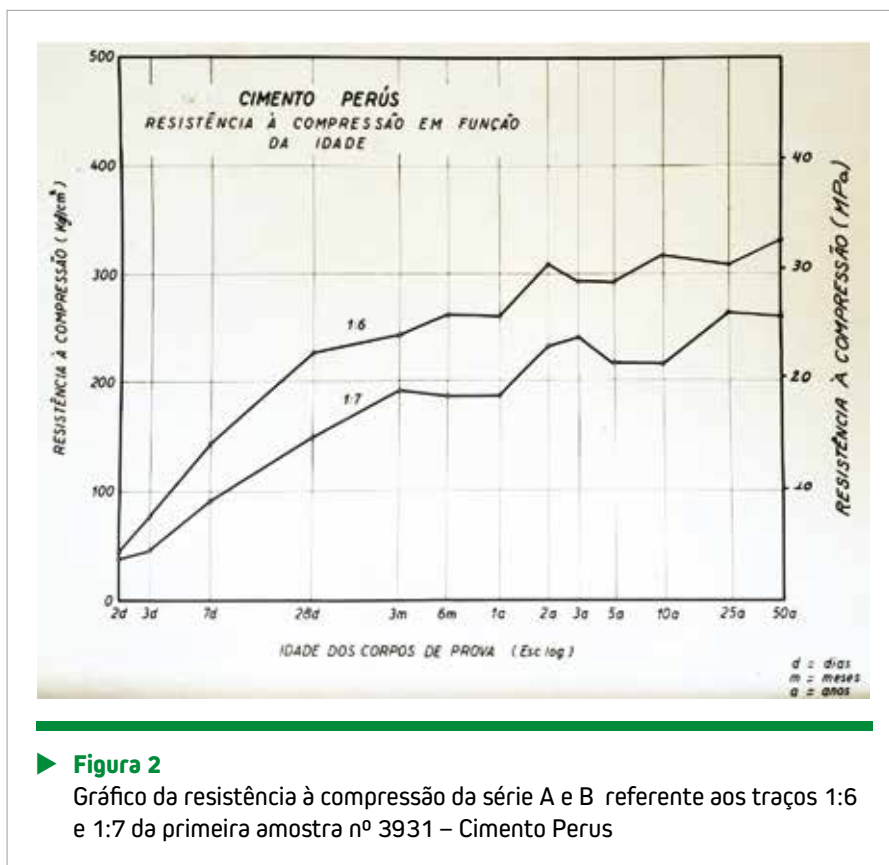
Os resultados obtidos recentemente mostraram que o concreto continuou a ganhar resistência. Pela tabela, é possível perceber que houve ganho significativo em comparação à idade de 28 dias. O gráfico mostra que o crescimento de resistência à compressão de todas as amostras seguiu a mesma linha de tendência.

Esses dados trazem informações importantes sobre o comportamento do concreto e enriquece ainda mais o banco de dados desse programa.

3. CONCLUSÕES

A partir do levantamento histórico realizado nesse projeto, é possível perceber que o programa “Estudo de dosagem de concreto de longa duração” permeia a história da indústria de cimento nacional e o aprimoramento da tecnologia do concreto no Brasil.

No país não se tem notícia de nenhum estudo semelhante a esse: somente o IPT, como pioneiro da tec-



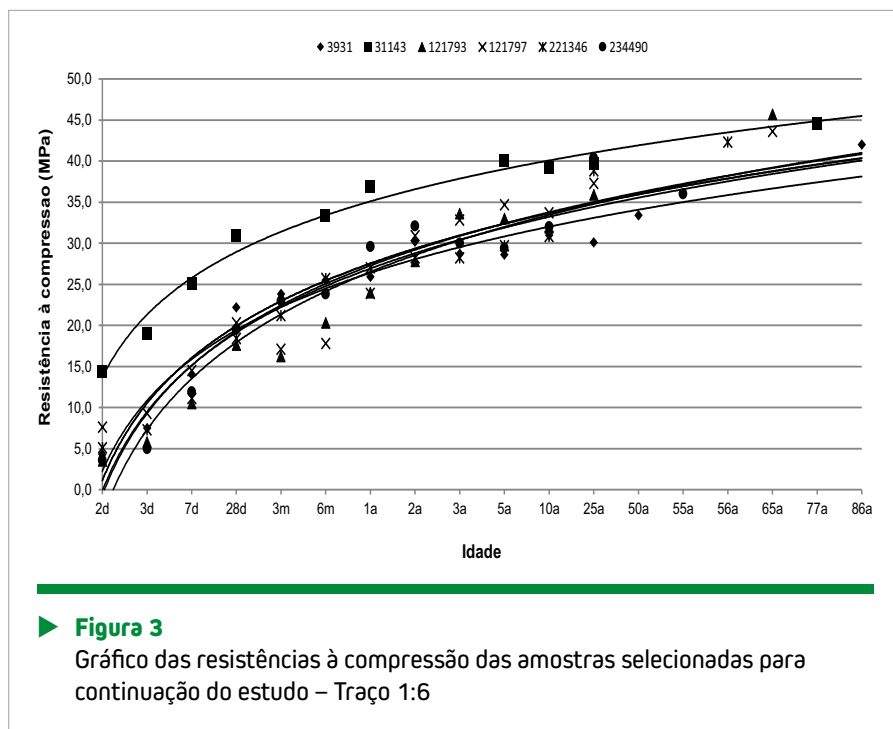
nologia do concreto no país, conduz um estudo tão longo. A Universidade de Wisconsin conduz estudo de longa duração, com programação de ensaios em corpos de prova de concreto de até 100 anos de idade, subdividido em séries – série A iniciou em 1910, série B, em 1923, e série C, em 1937.

Como apresentado, quando Ary

Torres idealizou o Programa, registrou-se que a finalidade era comparar alguns traços de concreto estabelecidos, sob o ponto de vista de durabilidade do concreto exposto ao ar, água simples e água do mar. Porém, no levantamento realizado, foi identificado que não foi atingido esse objetivo, já que para série C e série D foram moldados corpos de prova apenas para

▶ **Tabela 7 – Resultados de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados em 2019**

Identificação da amostra	Código da marca	Ano da moldagem	Resistência à compressão média (MPa)	
			28 dias	Resultado do ensaio realizado em 2019
3931	3	1933	22,2	42,0
31143	3	1942	30,9	44,6
121793	3	1954	17,6	45,7
121797	5	1954	20,3	43,6
221346	3	1963	18,4	42,3
234490	5	1964	19,5	36,0



as duas primeiras amostras. No entanto, as moldagens da série A e B continuaram até 1965, de modo que o estudo se concentrou nos ensaios de longa duração dos concretos expostos ao ar até 50 anos de idade.

Apesar da complexidade do Programa, dado que foram realizadas coletas de amostras de cimento e moldados corpos de prova durante 32 anos, com aproximadamente 80 anos de resultados de ensaios emitidos, foi encontrada uma padronização no processo, desde o planejamento, as moldagens, os registros das amostras, até as emissões dos certificados.

Neste projeto intencionou-se tra-

balhar na digitalização e sistematização de toda a documentação e dos resultados produzidos, de forma que esses dados não se perdessem no tempo, bem como organizar e catalogar os corpos de prova restantes, a fim de finalizar os ensaios de resistência mecânica como proposto inicialmente no começo do século XX, e investigar esses concretos em relação à sua microestrutura, uma vez que é, nessa escala, que ocorrem as principais transformações que influenciam todas as propriedades do concreto em longas idades.

Cabe ressaltar que os idealizadores e principais participantes desse programa foram ousados e despren-

didados, tiveram uma visão ainda maior que o prazo desses ensaios, pois o planejamento poderia se tornar obsoleto com o passar do tempo, o local de armazenamento e a identificação dos corpos de prova precisariam resistir ao tempo, o laboratório ou o patrocinador poderiam vir a deixar de existir; além disso, eles não estariam vivos para concluir o estudo, deixando essa responsabilidade, os frutos e o legado para as futuras gerações do Laboratório e da comunidade técnica em geral. Este programa atravessou gerações no IPT, que, desde a sua fundação como Gabinete de Resistência dos Materiais, colaborou com o processo de desenvolvimento tecnológico do País, cumprindo sua missão como braço tecnológico do Estado, a serviço da sociedade.

Hoje, com 120 anos de história, o IPT conta com infraestrutura de aproximadamente 103 mil m², que abriga 37 Laboratórios e Seções Técnicas, pertencentes a 9 centros e dois núcleos tecnológicos na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, em São Paulo (SP), além de uma unidade em Franca (SP) e o Núcleo de Estruturas Leves (LEL), no Parque Tecnológico de São José dos Campos (SP), e é considerado como um dos maiores institutos de pesquisas do Brasil. 🏠

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT. História da normalização brasileira. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2011.
- [2] BATTAGIN, Arnaldo Forti, MUNHOZ, Flavio André Cunha Munhoz, BATTAGIN, Inês Laranjeiras S. Evolução da normalização, finura e resistência à compressão dos cimentos Portland brasileiros. Revista Concreto & Construções, São Paulo, nº 80, p. 117-122, out/dez, 2015.
- [3] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Histórico de sua evolução. Boletim nº 20. São Paulo, IPT, 1939. 102 p.
- [4] TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. Um estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento Portland até 50 anos de idade. Boletim nº 60. São Paulo, IPT, 1991. 36 p.
- [5] TORRES, Ary Frederico. Dosagem racional dos concretos. Boletim nº 3. São Paulo: Escola Polytechnica de São Paulo, 1929. 32 p.



Controle tecnológico de concreto projetado com fibras nos túneis da UHE Chaglla – Peru

SANDRO MENDES – ENGENHEIRO CIVIL | CARLOS LÚCIO – ENGENHEIRO CIVIL | VALDEMAR FURLANETTO – ENGENHEIRO CIVIL

I. INTRODUÇÃO

O presente artigo tem por finalidade descrever o controle tecnológico do concreto projetado com fibras utilizado nos túneis da Usina Hidroelétrica de Chaglla, no Peru.

2. DADOS DO PROJETO

A Usina Hidrelétrica de Chaglla está localizada no Peru, no departa-

mento de Huánuco. Nas bordas dos Andes, voltada para a região da floresta Amazônica. A construção foi iniciada em 2011 e entrou em operação no final do ano de 2015, resultando em cerca de 10% da geração de energia elétrica peruana.

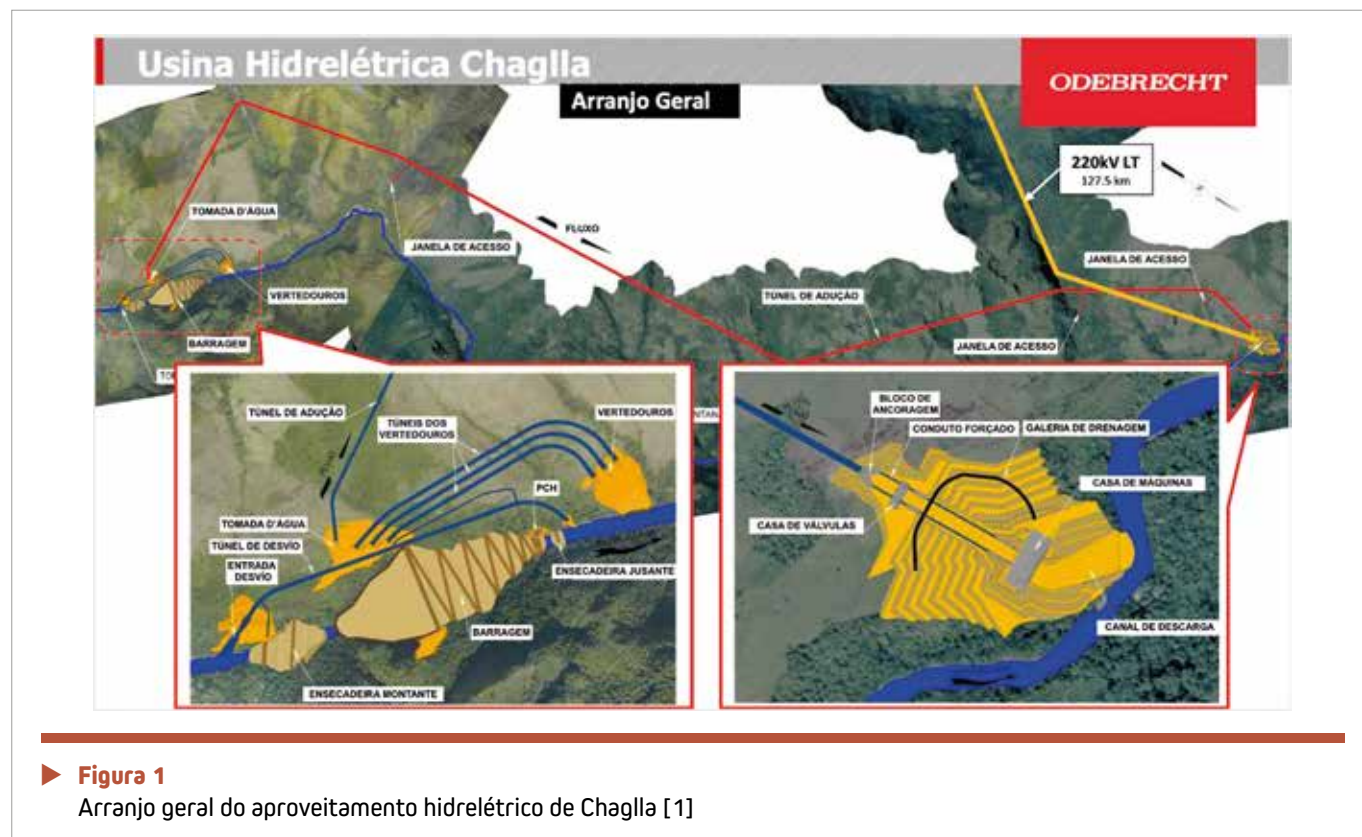
Concebeu-se a barragem como sendo a de uma estrutura de enrocamento, com face de concreto de 209m de altura (a 3ª maior BEFC do mundo), cujo

volume de aterro atingiu 8.400.000 m³ e comprimento de crista de 270m [1].

O arranjo geral do empreendimento está apresentado na Figura 1.

O desvio do rio Huallaga foi efetuado por um túnel, não revestido, situado na margem esquerda, com 1.126 m de comprimento, em seção arco-retângulo e diâmetro equivalente de 12,5m (Figura 2).

O vertedouro, também situado



► **Figura 1**
Arranjo geral do aproveitamento hidrelétrico de Chaglla [1]

na margem esquerda, foi concebido para uma vazão máxima provável de $5.630\text{m}^3/\text{s}$ (operando apenas dois de seus três túneis é possível extravasar uma vazão de $3.621\text{m}^3/\text{s}$, vazão decamilenar). Consiste em três túneis, em seção arco-retângulo, de 14,75 m de diâmetro, com comprimento total de 2.518 m e estruturas de controle com comportas radiais situadas junto às saídas de jusante (Figura 3).

Adjacente às estruturas do vertedouro, estão localizados o túnel de adução da PCH (Pequena Central Hidrelétrica), com 458 m de comprimento, que aproveita a vazão ecológica para gerar 6 MW e o túnel do circuito de geração principal, com extensão de 15,615 km, até a casa de força principal, que tem potência instalada de 450 MW. (Figura 4).

Para realizar o túnel de adução e as janelas de acesso ao túnel (Janela Zero, I, II, III, IV, cada uma com 300 metros de comprimento), foram necessários 95.000 metros cúbicos de concreto projetado para o revestimento das paredes dos túneis. Esse valor representa 27% do volume total de concreto da obra; portanto, desde o início, era necessário realizar monitoramento e testes contínuos para garantir que o produto final despachado da usina de concreto não apresentasse problemas nas 8 frentes de trabalho. [3]

3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PROJETO PARA O CONCRETO PROJETADO

As principais diretrizes iniciais para o concreto projetado especificadas pela projetista Intertechne, descritas nas Especificações Técnicas de Obras Cíveis do Projeto Central Hidroelétrica Chaglla [4], são apresentadas a seguir:

► O concreto projetado pode ser ad-

mitido como suporte permanente nas superfícies das escavações e com as espessuras mostradas nos projetos de engenharia;

► O concreto projetado pode ser lan-

çado com ou sem malha metálica, ou com ou sem fibras de aço, segundo o indicado nos projetos;

► Independente do tipo de sustentação (revestimento) definitivo a



► **Figura 2**
Vista e seção transversal do túnel de desvio



► **Figura 3**
Vista e seção transversal dos túneis dos vertedouros



► **Figura 4**
Vista geral e seção transversal do túnel de adução

ser aplicado nos túneis, deve-se aplicar uma primeira camada de concreto projetado para estabilização da rocha, evitando desprendimento de material durante a instalação do revestimento defi-

nitivo e etapas seguintes do ciclo – o concreto projetado desta capa foi dosado com fibras metálicas quando se observou presença de água de infiltrações; nas superfícies secas, podem ser utilizadas fibras

sintéticas estruturais em lugar da fibra metálica;

- As diretrizes para o controle de qualidade da obra foram as práticas recomendadas pela ASTM e seções pertinentes dos volumes 13 e 14 das normas do ACI.

Quanto aos materiais, as especificações estabelecem que o cimento pode ser do Tipo I, de baixo teor de álcalis, ou pozolânico, que satisfaça aos requisitos da ASTM C150 e ASTM C595. Os agregados miúdos puderam ser de origem natural ou manufacturados, ou combinação de ambos, com módulo de finura entre 2,3 e 3,1. Os agregados graúdos foram especificados com tamanho máximo de 19mm (3/4"), desde que correspondessem à ASTM C33 e fossem constituídos de partículas limpas, duras e resistentes. O aditivo acelerador de pega foi não alcalino e isento de cloretos solúveis em água. Os traços de concretos projetados puderam conter sílica ativa ou metacaulim, em teores não menores que 6% do peso do cimento, e cumprirem os respectivos requerimentos para

► **Tabela 1 – Plano de inspeção e ensaios para projetado via seca e via úmida**

Descrição do ensaio	Norma / Método	Frequência	Critério aprovação	Laboratório
Amostragem do concreto	—	Cada 50 m ³ e ao menos uma vez ao mês	—	Lab CNO
Slump test (polecada)	ASTM C143	Antes de iniciar os trabalhos	8" ± 1,5"	Lab CNO
Controle de temperatura	ASTM C1064	Antes de iniciar os trabalhos	< 30° C	Lab CNO
Ar incorporado (%)	ASTM C231	Antes de iniciar os trabalhos	< 5%	Lab Ext
Massa unitária (kg/m ³)	ASTM C138	Antes de iniciar os trabalhos	N/A	Lab Ext
Estudo experimental de dosagens	ACI 506R-05	Antes de iniciar os trabalhos/cada mudança de insumo	> f'c	Lab CNO
Resistência à compressão (MPa)	ASTM C39	Cada 200 m de túnel	> 0,85.f'c	Lab CNO
Resistência à flexão / tenacidade (MPa)	ASTM C1609	Cada 200 m de túnel	3,4 MPa / > 1 MPa a 2 mm	Lab CNO
Moldagem de placas	ASTM C1140	Cada 200 m de túnel	> f'c	Lab CNO

Notas: Lab CNO – Laboratório obra; Lab Ext – Laboratório externo; N/A – não se aplica

uso em concreto. As malhas eletrosoldadas e as fibras de aço utilizadas como reforço cumpriram os requisitos da seção própria dentro das especificações. A água cumpriu os requisitos para uso em concreto convencional.

Quanto às dosagens, as especificações técnicas requereram a realização de estudos experimentais prévios, com antecipação à aplicação do concreto projetado em obras definitivas. Não se pôde iniciar os trabalhos de lançamento até que os traços e os procedimentos de aplicação tivessem sido aprovados.

4. CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO PROJETADO

4.1 Plano de inspeção e ensaios normatizados

De acordo com as especificações técnicas do projeto, por parte do controle de qualidade da obra, foram preparadas placas para ensaio em cada frente de trabalho e extraíram-se testemunhos de aproximadamente 7,5cm de diâmetro, para efetuar o controle de resistência, para cada 200 metros de longitude do túnel e nos locais escolhidos ao acaso, para o controle de espessura e resistência.

Para o atendimento das diretrizes especificadas foram elaborados planos

de inspeção e ensaios para controle de qualidade de todos os materiais constituintes do concreto (cimento, água, aditivos, agregados). Além disso, foi elaborado, pelo controle de qualidade da obra, o plano de inspeção e ensaios para concreto projetado via seca e via úmida, conforme Tabela 1.

4.2 Materiais constituintes

Algumas características dos materiais constituintes utilizados nas dosagens do concreto projetado utilizado nos túneis: cimento Portland Andino Tipo IP (ASTM C150 e C595), com 23,5% de pozolana, para inibir possível reação álcali-agregado e exposição a ambiente com ataque de sulfatos; agregado miúdo, areia natural com módulo de finura de 2,72; agregado graúdo de diâmetro máximo 9,5mm, para minimizar reflexão do concreto; aditivos aceleradores de pega isentos de cloretos (Sigunit L60 AF e Meyco SA160); fibra metálica Sikafiber CHO 65/35 e macrofibra polimérica estrutural BarChip 54 (Figura 5).

4.3 Dosagens

Os concretos projetados deveriam atingir a resistência mínima de 25 MPa aos 28 dias de idade, conforme solicitado pelo projetista.

Os traços para concreto projetado via úmida com fibras, desenvolvidos durante o estudo experimental e apro-



► **Figura 5**
Fibra metálica e sintética



► **Figuras 6 e 7**
Corpos de prova para ensaios com fibras

► **Tabela 2 – Tabela de traços de concreto projetado**

Características da dosagem				Características dos materiais									
Tipo	Resistência f'c (MPa)	Idade (dias)	Slump test (")	Cimento IP (kg/m³)	Água (l/m³)	Agregado		Aditivos				Fibras	
						MF 2,72 3/16" (kg/m³)	9,5 mm 3/8" (kg/m³)	Sikament 306 (kg/m³)	Sika Aer (kg/m³)	Sigunit L60 AF (kg/m³)	Meyco SA160 (kg/m³)	Sintética BarChip (kg/m³)	Metálica Sika Fiber (kg/m³)
25-VH	25	28	8 ± 1	400	180	1197	643	6,00	0,20	—	42,10	—	34,0
25-VH	25	28	8 ± 1	400	180	1197	643	6,00	0,20	20,00	—	4,5	—



vados para uso no projeto, são apresentados na Tabela 2, com as respectivas quantidades dos materiais por m³.

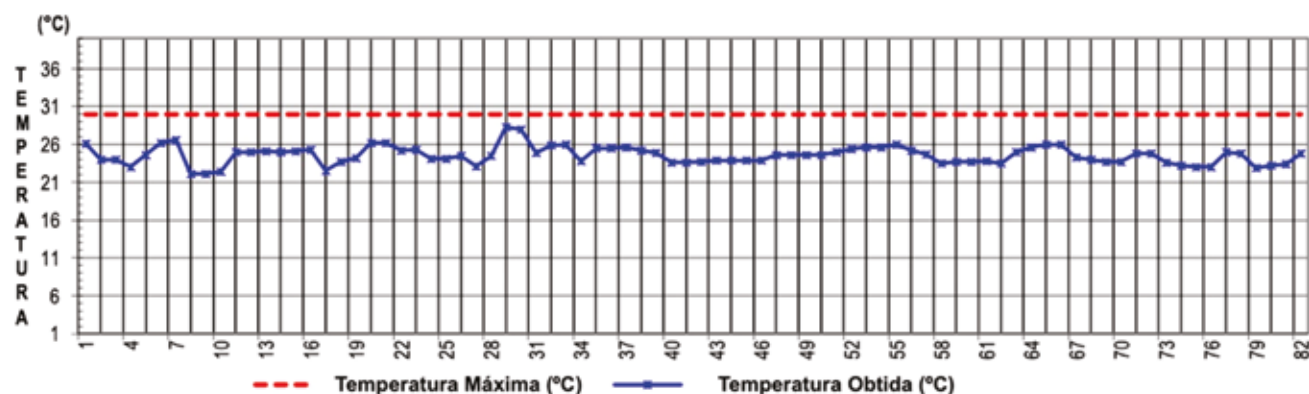
O desenvolvimento do concreto projetado com fibras sintéticas (Figuras 6 e 7) foi realizado em conjunto com a

Pontifícia Universidad Católica del Peru e consta do Informe Técnico CHC-IT4-32B44-0001 [2]. Os requisitos para validação do uso da fibra sintética nos concretos projetados em substituição às fibras metálicas foram: resistência à compressão simples superior a 25 MPa; resistência à flexão de viga maior ou igual a 3,4 MPa (tensão máxima no primeiro pico) e resistência à flexão residual superior a 1 MPa (para deflexão de 2 mm); e tenacidade (EFNARC 1996) superior a 500 Joules (para deflexão de 25 mm).

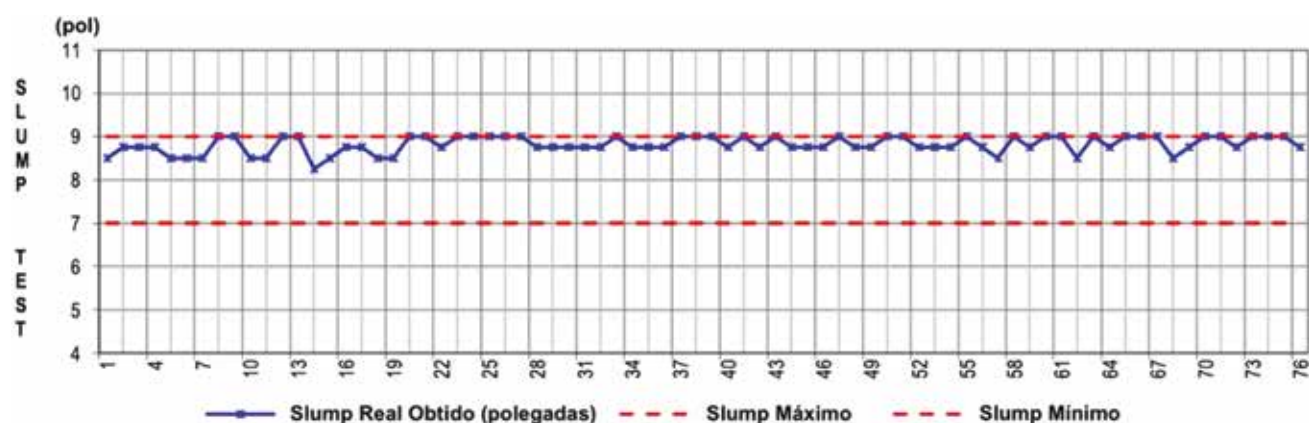
O laudo da PUC-Peru apresentou as seguintes conclusões: “A fibra

► **Tabela 3 – Resumo dos resultados do comparativo fibras metálicas x sintéticas [3]**

Propriedades físicas	Fibra metálica	Fibra sintética	Limites especificação
Absorção de energia (J)	703	779	> 600 J
Tenacidade MR Máx (MPa)	3,8	4,1	> 3,4 MPa
Resistência testemunhos extraídos (MPa)	33,5	31,0	> 0,85.f'c
Resistência corpos de prova moldados (MPa)	34,3	40,4	> f'cr



► **Gráfico 1**
Controle de temperatura do concreto fresco



► **Gráfico 2**
Controle de abatimento do concreto fresco (*slump test*)

BarChip 54 cumpre com as especificações, apresenta melhor desempenho técnico e não apresenta o inconveniente da oxidação por exposição ao ar livre presente nas fibras de aço.” Os resultados de ambas fibras cumprem e superam os requisitos especificados nas Normas ASTM (Tabela 3).

Após este estudo, foi considerado satisfatório pela projetista o uso do concreto projetado com fibra sintéti-

ca em todas as etapas de execução dos túneis.

4.4 Resultados de ensaios de controle tecnológico

O controle tecnológico do concreto projetado no estado fresco foi realizado em todos os caminhões-betoneira que chegavam às frentes de trabalho, com ensaios de temperatura e abatimento do tronco de cone, para liberação do lançamento do concreto projetado, como pode ser visto nos Gráficos 1 e 2.

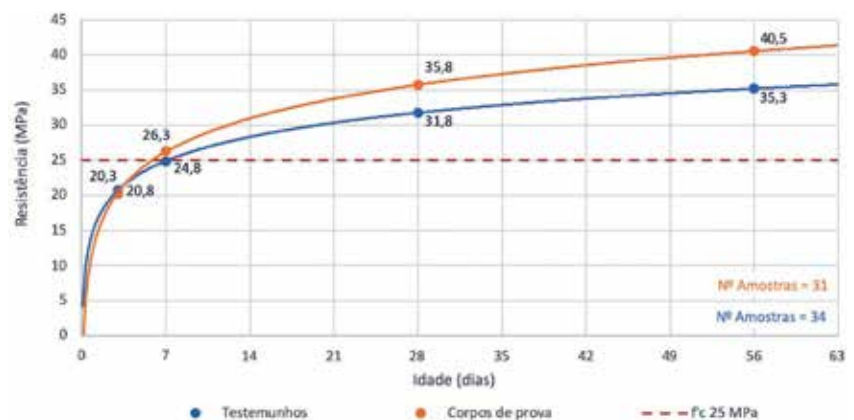
O controle de qualidade do concreto projetado endurecido englobou o controle da resistência à compressão de corpos de prova moldados (Gráficos 3 e 4), testemunhos extraídos de placas moldadas nas frentes de trabalho (Figura 9 e Gráfico 5) e testemunhos extraídos diretamente dos revestimentos dos túneis (Figura 10 e Tabela 4), de acordo com o ACI 318S-11. Ao total foram executados e controlados 59.811 m³ de concreto projetado com fibras, sendo 4.501m³ com fibra metálica e 55.310 m³ com fibra sintética.



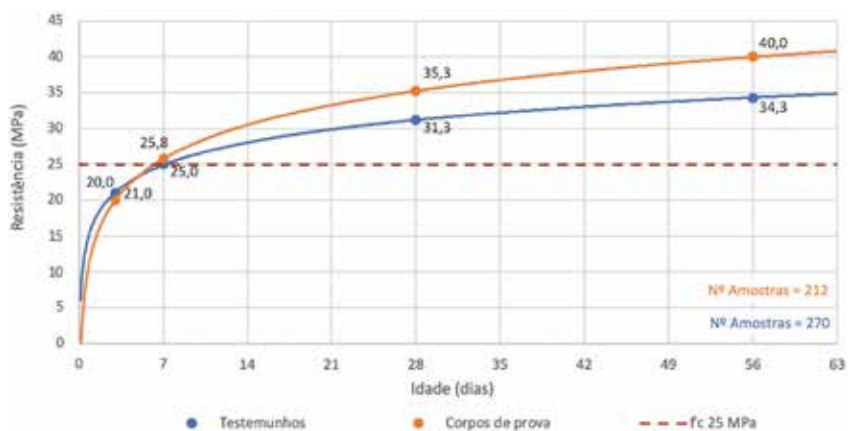
► **Figura 8**
Lançamento de concreto com fibras com braço robótico de projeção



► **Figuras 9 e 10**
Placa moldada e extração de testemunhos

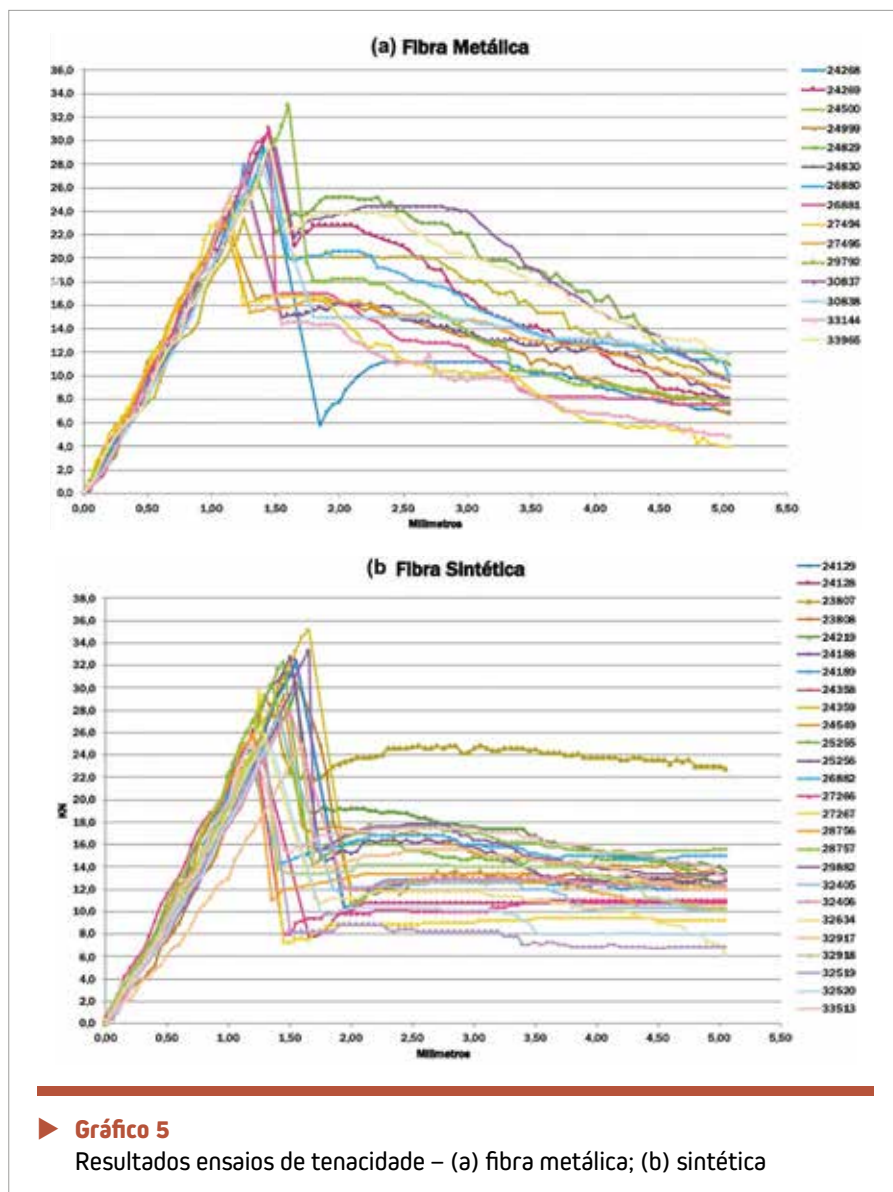


► **Gráfico 3**
Evolução da resistência: testemunhos x corpos de prova – fibra metálica



► **Gráfico 4**
Evolução da resistência: testemunhos x corpos de prova – fibra sintética





► **Gráfico 5**
Resultados ensaios de tenacidade – (a) fibra metálica; (b) sintética

O concreto projetado de revestimento do túnel cumpriu com o fck 25 MPa com ambas fibras e em todos os ensaios de controle de resistência realizados.

Como análise comparativa, para os concretos com fibra metálica, considerando-se a resistência média dos cilindros moldados na central de concreto como referência 100% (37,4 MPa), tem-se, então, que os painéis alcançaram 85% (31,8 MPa) e os testemunhos extraídos em campo 82,6% (30,9 MPa).

Além dos ensaios de resistência, o controle tecnológico realizava rotineiramente ensaios de tenacidade de vigas, com os dois tipos de fibras, como pode ser visto nos Gráficos 5(a) e (b) e Tabela 5.

4.5 Aderência ao substrato

Uma importante característica estrutural da aplicação do concreto projetado em túneis é a aderência ao substrato rochoso. Para verificar a aderência mínima, foram realizados ensaios de arrancamento em cada frente de serviço dos túneis. As Figuras 11 e 12 apresentam o esquema do ensaio e sua execução.

► **Tabela 4 – Avaliação da conformidade de testemunhos extraídos do revestimento – ACI 318S-11**

	Ventana 0	Ventana 1		Ventana 2		Ventana 3		Ventana 4
	Frente de trabalho 1	Frente de trabalho 2	Frente de trabalho 3	Frente de trabalho 4	Frente de trabalho 5	Frente de trabalho 6	Frente de trabalho 7	Frente de trabalho 8
Nº de amostras	6	18	18	7	8	13	16	15
Média por frente (MPa)	29,5	30,8	32,3	26,8	30,4	29,1	36,6	31,2
Desvio padrão (MPa)	6,0	6,6	5,5	6,8	6,3	5,0	4,5	5,0
Coefficiente de variação (%)	20,4	21,5	17,2	25,3	20,7	17,2	12,4	16,3
Menor valor individual (MPa)	24,0	22,0	22,0	21,0	22,0	21,0	28,0	23,0
Condição 1: Média > 0,85 x f'c = 21,25	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
Condição 2: Menor valor individual > 0,75 x f'c = 18,75	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme

Vigas	Módulo de ruptura	MR a 2 mm	Módulo de ruptura	MR a 2 mm
Tipo de fibra:	Metálica		Sintética	
Nº de amostras	26		15	
Média acumulada	3,78 MPa	2,46 MPa	3,91MPa	1,89 MPa
Desvio padrão	0,41 MPa	0,63 MPa	0,46 MPa	0,51 MPa
Coefficiente variação	10,9%	25,5%	11,7%	27,2%
Limite especificado	> 3,5 MPa	> 1 MPa	> 3,5 MPa	> 1 MPa

Após a execução do ensaio, foi avaliada a carga máxima de arrancamento e determinada a tensão de ruptura, que deve ser superior a mínima especificada. Realizava-se também a análise visual do testemunho extraído para avaliar a qualidade da interface entre o concreto projetado e a rocha, como pode ser visto nas Figuras 13 e 14.

Observa-se nas figuras que a adesão do concreto projetado à rocha é muito boa: o que acontecia é que, em todos os testemunhos, a ruptura ocorria na rocha, pois o maciço era muito fraturado.

Além desses, ensaios de cisalhamento foram realizados para comprovar a aderência entre con-

creto projetado e o maciço rochoso. Entre eles: o ensaio ASTM D6916, um método de teste padrão para determinar a resistência ao cisalhamento entre unidades de concreto segmentadas (blocos de concreto modulares).

O teste é utilizado para determinar a resistência ao corte nas uniões entre dois materiais, o concreto projetado e a rocha, em amostras remoldadas e em amostras extraídas, cujo esquema é mostrado na Figura 15.

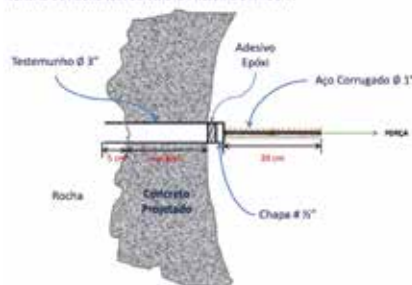
Cabe destacar que os ensaios realizados em laboratório da obra foram em rocha lisa e plana (Figuras 16 e 17). No campo, este tipo de uniformidade não é encontrado. Pelo contrário, a superfi-

cie da rocha é irregular. Mas, a despeito daquilo, a aderência do concreto projetado à rocha foi claramente notada.

De acordo com os valores obtidos de tensão de aderência (Gráfico 6), a adesão entre a rocha e o concreto



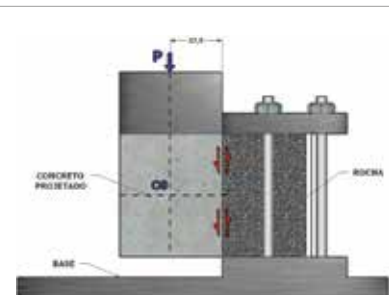
TENSÃO DE ADERÊNCIA CONCRETO PROJETADO X ROCHA



► Figuras 11 e 12
Ensaio de arrancamento em concreto projetado e seu esquema



► Figuras 13 e 14
Inspeção visual dos testemunhos extraídos

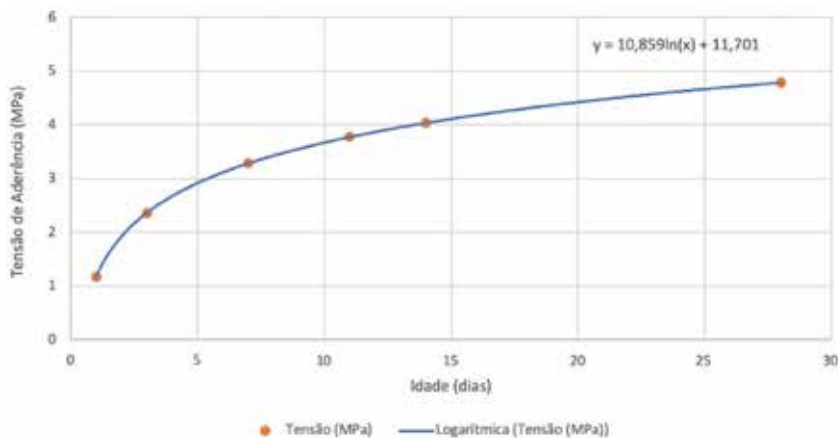


► Figura 15
Esquema do método de ensaio ASTM D6916



► Figuras 16 e 17
Amostras ensaiadas pelo método ASTM D6916





► **Gráfico 6**
Valores obtidos de tensão de aderência no ensaio ASTM D6916

projetado apresentou bons resultados, garantindo perfeita integridade entre os dois elementos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto projetado para os revestimentos dos túneis de Chaglla foi considerado bastante satisfatório. Considera-se que a substituição da fibra metálica pela fibra sintética estrutural trouxe as seguintes vantagens:

- o tempo de mistura permaneceu o mesmo praticado nos outros concretos;
- a adição da quantidade de fibra sintética (4,5 kg/m³) é mais simples e prática, considerando o mesmo procedimento utilizado com a fibra metálica;
- no bombeamento, por ter atrito interno muito baixo, apresentou um maior rendimento na produção e menor desgaste da tubulação, com menos entupimentos;

- como ponto principal em relação à durabilidade, a não oxidação, diferentemente do que ocorre com a fibra metálica;
- seu custo final foi de 62% do custo da fibra metálica.

A fibra BarChip 54 já havia sido utilizada em outras obras: Central Hidrelétrica Angostura e nos Túneis Subterrâneos Chuquicamata (Chile), Projeto Hidrelétrico em Churin e em duas unidades mineradoras Cerro Lindo e El Porvenir (Peru). A fibra foi otimizada pelo fabricante após os estudos realizados na obra, melhorando sua forma e, assim, sua aderência.

Cabe destacar que durante o enchimento do túnel de adução da Casa de Máquina Principal, houve uma fuga por uma estrutura cárstica¹ paralela ao túnel, obrigando seu esvaziamento completo para seu reparo. As vistorias realizadas em toda a extensão do túnel mostraram que o comportamento do

concreto projetado atendeu sua função, não havendo pontos significativos de falha.

6. AGRADECIMENTOS

Aos diretores de contrato da obra: Pedro Henrique Schettino e Leonardo Borgatti – Odebrecht Engenharia e Construções.

Ao engenheiro projetista:

Alex Martins Calcina – Diretor de Unidade de Energia e Infraestrutura, Interthécne Consultores S.A.

Ao engenheiro consultor:

Selmo Kuperman.

Ao engenheiro industrial:

Ivan Jhoel Jara Nunura.

Ao técnico laboratorista:

Rafael Arnecke. 

FICHA TÉCNICA

Construtora

ODEBRECHT
Engenharia e Construção

Projetista

INTERTÉCHNE Consultores S.A.

Fornecedores de fibras, aditivos etc.:

fibra metálica: SIKA; fibra sintética: EPC Elasto Plastic Concrete; cimento Portland: Cimento ANDINO S.A.; aditivo acelerador: BASF; aditivo acelerador: SIKA.

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JEISS, CALCINA, PINTO e BORGATTI. Barragem de Chaglla – Principais Aspectos. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu-PR, Maio, 2015.
- [2] FURLANETTO, V. Investigación Técnica para el Shotcrete: Investigación del Desempeño Técnico de la Fibra BarChip 54 x Sika CHO 65/35. Informe Técnico CHC-IT4-32B44-0001 RO, 15/05/2012.
- [3] JARA NUNURA, I. J. Control de Calidad de Concreto Lanzado Usando Fibra Sintética en Reemplazo de Fibra Metálica. Informe para Título de Ingeniero Industrial. Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería, Peru, 2016.
- [4] INTERTÉCHNE. Especificaciones Técnicas de Obras Civiles – CH Chaglla. ET Nº 0918-CG-ET-200-00-201 Rev. 0. Agosto, 2010.

¹ ESTRUTURA ROCHOSA COM CAVERNAS, CÂNIONS E FALHAS GEOLÓGICAS PRODUZIDAS PELA AÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA SOBRE ROCHAS SOLÚVEIS.

Concreto projetado para impermeabilização por cristalização de túneis

EMILIO M. TAKAGI – DOUTORANDO E DIRETOR TÉCNICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA)
PENETRON INTERNACIONAL

MARYANGELA G. LIMA – PROFESSORA DOUTORA

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E EDIFICAÇÕES
DO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA)

DOMINGO LEMA COFRE – GERENTE GERAL

PENETRON CHILE SPA

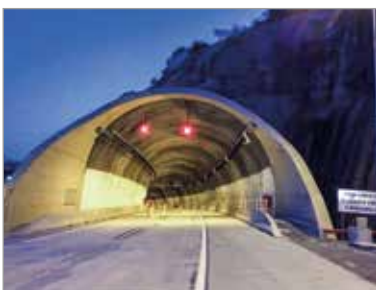
I. INTRODUÇÃO

Na execução de túneis revestidos com concreto projetado, as técnicas de impermeabilização e drenagem devem ser concebidas considerando-se todos os elementos e processos da execução desse revestimento. Nos túneis metroviários, o sistema impermeabilizante normalmente aplicado em larga escala é a geomembrana de PVC-P, com emprego de aditivo cristalizante no revestimento secundário da estru-

tura de concreto. Nos túneis rodoviários, a drenagem perimetral é de difícil solução, e a opção com melhor custo-benefício tem sido a drenagem localizada das infiltrações e a aplicação de uma camada de concreto projetado com aditivo cristalizante, como premissa geral da filosofia do “Túnel Seco” (Figura 1). Ressalta-se que a impermeabilização deve ser preferencialmente pensada sob o foco de manutenção e operação dos túneis, com visão a longo prazo.

O maior impacto das infiltrações de água ocorre durante a construção de túneis, mas os problemas serão sentidos durante muito tempo na sua operação e manutenção. Os processos de tratamento de infiltrações iniciam-se com a instalação de drenos horizontais profundos (DHP), ou mantas drenantes, aplicados em forma de espinha de peixe do tipo “Método Oberhasli”¹. Devem ter capacidade para coletar e conduzir todas as águas infiltradas para possibilitar condições para uma superfície sem fluxo de água, possibilitando a aplicação de camada suporte em concreto projetado.

A impermeabilidade do concreto projetado de túneis pode ser obtida por um mecanismo de formação de cristais extras na sua microestrutura. Induzida pela adição do aditivo cristalizante, a impermeabilização resultante, com capacidade autocatrizante contra infiltração de água através de fissuras, é usada principalmente nos revestimentos primários em concreto projetado, mas pode também ser adotada no concreto secundário, como discutido no presente artigo (Figura 2).



► Figura 1

Túnel do Formigão BR 101-SC, com 530 metros de extensão, possui drenagem perimetral, com posterior projeção de concreto impermeável com aditivo cristalizante, para a obtenção da filosofia do “Túnel Seco”



► Figura 2

O túnel Marcello Alencar, com 3.022 metros de extensão, é o maior túnel subterrâneo urbano do Brasil. O aditivo cristalizante foi utilizado no revestimento secundário de concreto do túnel

¹ PROCEDIMENTO DE CONTROLE DE INFILTRAÇÕES EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS DE TÚNEIS.

► Tabela 1 – Elementos do sistema de impermeabilização em função do perfil hidrogeológico, optando-se pelo emprego de concreto projetado autocicatrizante

Perfil hidrogeológico	Camada de contenção de 1ª fase	Pré-tratamento	Sistema impermeabilizante	Camada definitiva de 2ª fase	Pós- tratamento	
Túneis de grande cobertura em rocha sã	Infiltrações localizadas	Concreto projetado autocicatrizante	Injeção de calda de cimento cristalizante	Concreto projetado autocicatrizante c/ fibras de aço	Injeção de resinas de poliuretano	
	Afluo de água localizada	Concreto projetado autocicatrizante	Injeção de calda de cimento cristalizante	Membrana projetável	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de poliuretano
	Com fluxos de água ativos	Concreto projetado autocicatrizante	Injeção de calda de cimento cristalizante	Geomembrana de PVC-P	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de poliuretano
Túneis de baixa cobertura em solo ou rocha alterada	Com grande fluxos de água ativos	Concreto projetado autocicatrizante	Injeção de calda de cimento cristalizante	Geomembrana de PVC-P e compartimentação com juntas de PVC	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de poliuretano ou géis de acrílico
Túneis em <i>shield</i> (TBM)	Com grande fluxos de água ativos e carreamento de areia	–	Injeção em cortina	Segmentos de concreto moldado autocicatrizante c/ veda juntas	Injeção de resinas de géis de acrílico	
Túneis de baixa cobertura em areia	Com grande fluxos de água ativos e carreamento de areia	Concreto projetado autocicatrizante	Injeção em cortina e injeção química	Geomembrana de PVC-P e compartimentação com juntas de PVC	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de poliuretano ou géis de acrílico

2. ELEMENTOS DOS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO EM TÚNEIS SUBTERRÂNEOS

Os sistemas impermeabilizantes em túneis metroviários e rodoviários são constituídos por um conjunto de elementos e processos, empregados para prover a estanqueidade das estruturas subterrâneas, novas ou existentes. Considerando a opção por concreto projetado autocicatrizante, esses elementos e processos podem ser empregados agrupados ou isoladamente, conforme o tipo de maciço, a quantidade de água infiltrada, o método construtivo empregado e o desempenho especificado para a obra (Tabela 1).

O NATM (*New Austrian Tunneling Method*) é o método construtivo não destrutivo que envolve escavações

sucessivas no maciço terroso, com a imediata projeção do concreto para equilíbrio das tensões geradas no maciço pela escavação, servindo como estrutura definitiva. Deve-se, sempre que possível, evitar o rebaixamento do lençol freático na execução do método NATM, evitando-se, assim, recalques indesejáveis e os consequentes prejuízos passíveis de serem provocados nas edificações lindeiras à obra.

Em geral, podem ser considerados os seguintes elementos e processos de impermeabilização de túneis construídos no sistema NATM:

► **Revestimento primário:** O concreto projetado da primeira fase deve ser devidamente dosado para garantir a continuidade de aplicação, de modo que, terminado todo o reves-

timento, não haja a possibilidade de a água se infiltrar por caminhos que não sejam os dos drenos provisórios ou permanentes;

► **Pré-tratamento:** As infiltrações persistentes do maciço terroso ou do revestimento primário podem ser tratadas, conforme a sua intensidade, por injeções preliminares de calda de cimento com aditivo cristalizante, onde a malha de injeção é constituída por furos dispostos em linhas paralelas, com distribuição defasada entre as linhas adjacentes (o comprimento dos furos deverá ser orientado por critério geológico, no sentido de atravessar o maior número de fraturas e juntas possível); recomenda-se que, antes do tratamento em toda



► **Figura 3**

Drenagem localizada de infiltrações, com posterior projeção de concreto impermeável com aditivo cristalizante, para a obtenção da filosofia do “Túnel Seco”

a área programada, seja feito o ajuste das variáveis do sistema de injeção (tipo de cimento, pressão de injeção, relação a/c, etc.) em um trecho experimental a ser escolhido com critério geológico;

- **Sistema Impermeabilizante:** No caso de se utilizar a geomembrana de PVC-P, ou membrana projetável, os insertos metálicos e cabeças de tirante de ancoragem (“rock bolt”) devem ser cortados, sendo posteriormente protegidos com a aplicação de uma camada complementar de concreto proje-



► **Figura 4**

Revestimento secundário em concreto projetado com aditivo cristalizante para impermeabilização por cristalização

tado, objetivando o estancamento imediato das infiltrações; a superfície deverá estar regularizada conforme exigência do fabricante, sendo obrigatória a colocação de um geotêxtil de polipropileno sobre o substrato regularizado, tanto como camada drenante quanto como proteção associada à geomembrana de PVC-P; em seguida, deve-se fazer a compartimentação com perfis *waterstop* extrudado de PVC, soldados sobre a manta de PVC, de forma a criar áreas confinadas e estanques, com o objetivo de permitir a detecção, localização e reparo de quaisquer infiltrações que possam ocorrer;

- **Revestimento secundário:** O revestimento secundário moldado *in loco* ou projetado com concreto autocicatrizante, de baixa permeabilidade, deve ser dosado com o aditivo cristalizante, com rastreador químico, em dosagem entre 0,8% e 1% sobre a massa de cimento, que atenda à norma ABNT NBR 11.768:2019 (a formação cristalina deve ser impermeável à água na forma líquida, mas permeável ao vapor d’água, para mitigar o efeito do “spalling” explosivo em situações de incêndio em túneis; sua principal função é reduzir a infiltração de águas agressivas e colmatar pequenas fissuras de até 0,5 mm; com isso, reduz-se substancialmente o risco de reações deletérias, que dependem da presença de água); em relação às etapas de aplicação, destaca-se sua aplicação sob a forma de pintura cristalizante antes de receber a próxima projeção de concreto; entre os lançamentos sucessivos do concreto moldado *in loco* deve

ser instalada a fita hidroexpansiva de reação controlada, distante a pelo menos 5 cm da borda da junta de construção, aplicada sobre primer específico à base de emulsão acrílica, impedindo que ela se mova durante o lançamento do concreto (Figura 4);

- **Pós-tratamento:** No caso de “bicheiras”, segregações, laminações ou outros vícios de construção, devem ser adotadas medidas complementares de recuperação de estanqueidade, que dependem do tipo de patologia que compromete a estanqueidade. Se as infiltrações ocorrerem através de fissuras de retração de origem térmica, plástica ou hidráulica, essas podem ser tratadas localmente utilizando-se:
 - Argamassa de pega rápida para tamponamento prévio das infiltrações, após a preparação da superfície e a abertura da canaleta: aplicar o cristalizante por pintura, como ponte de aderência, e, enquanto estiver fresca, aplicar a argamassa cimentícia de reparo com cristalizante em camadas;
 - Injeções de resina de poliuretano hidroativada expansiva, sem solventes, de reação rápida com a água, formando uma espuma celular densa, flexível e fina para interromper temporariamente as infiltrações de água; devem ser aplicadas em conjunto com resina de gel de poliuretano flexível, com baixa viscosidade, elástica, livre de solvente, para selar permanentemente fissuras úmidas e secas, criando um selamento estanque;
 - Injeções de géis poliméricos de acrílico, com baixíssima viscosidade, sem solventes, de reação



controlada com catalisador, formando uma membrana elástica densa, flexível e fina, para selamento definitivo de infiltrações através de poros e fissuras úmidas, criando uma cortina de selamento estanque.

Outros materiais que proporcionem efeito de drenagem provisória podem também ser utilizados antes do endurecimento de uma camada de concreto projetado. Esses materiais não devem prejudicar, em nenhuma região, o atrito entre o concreto projetado e o terreno, não sendo admitida a existência de espaços vazios entre o terreno e o concreto projetado.

3. ADITIVOS CRISTALIZANTES PARA A AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

Na última década uma grande quantidade de artigos de pesquisa dedicou-se à autocicatrização “engenheirada”, em diferentes aspectos de investigação. Como relatado no último Congresso Internacional de Materiais Autocicatrizantes (ICSHM 2019), em Yokohama, no Japão, atualmente a autocicatrização autônoma reúne tecnologia suficiente para selar fissuras com abertura de até 1,0 mm em concreto, tais como: a autocicatrização com reforço de fibras, induzida por bactérias produtoras de minerais, por polímero superabsorvente, por agente cicatrizante contido em cápsulas e, como neste artigo, pela ação de aditivo cristalizante especialmente desenvolvido para esse fim.

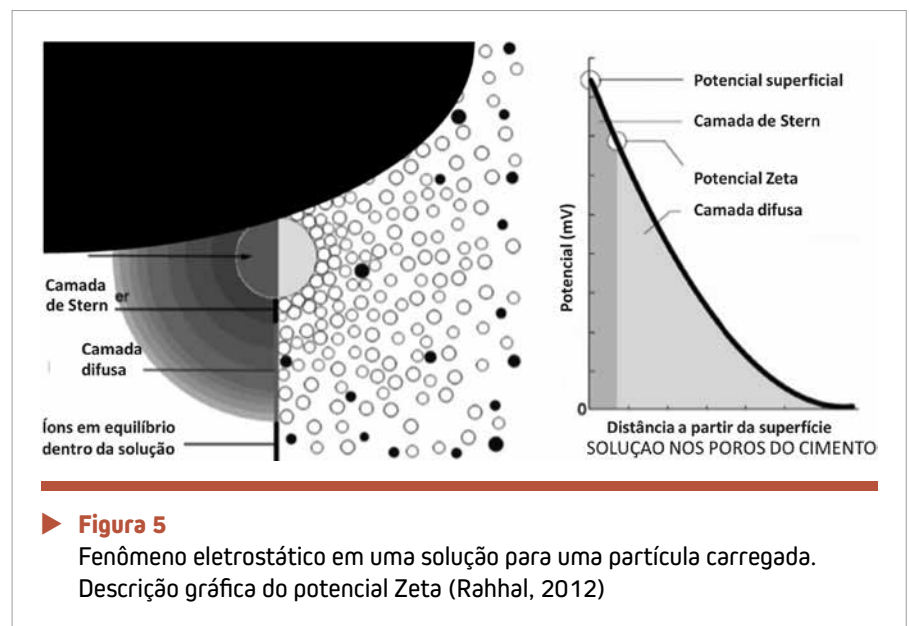
O consenso alcançado sobre o concreto autocicatrizante na comunidade internacional resultou no relatório de estado da arte da RILEM “Fenômeno

de autocicatrização em materiais à base de cimento”, publicado em 2013, pelo Comitê Técnico 221-SHC, criado em 2005. É importante salientar que a autocicatrização “autônoma” (ou de engenharia) é a restauração de propriedades mecânicas e redução da permeabilidade devidas não apenas aos próprios componentes do concreto (autocicatrização autógena), mas sobretudo a alguma adição, como materiais cimentícios suplementares, fibras de aço ou polipropileno e aditivos cristalizantes.

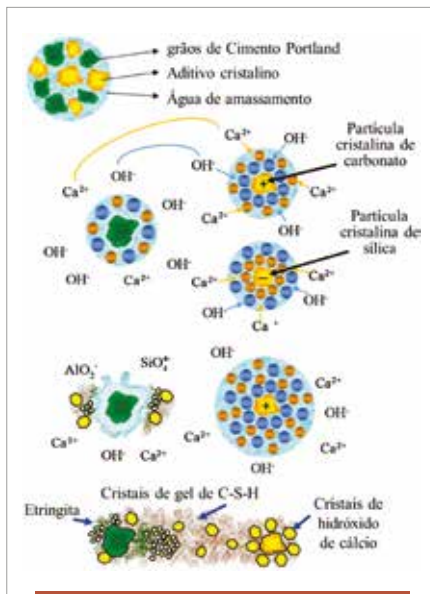
O aditivo redutor de permeabilidade por cristalização (RPC), segundo a norma ABNT NBR 11.768:2019 “Aditivos químicos para concreto de Cimento Portland” e a norma ACI 212.3R:2016 “*Report on Chemical Admixtures for Concrete*”, combina-se com o cimento e partículas cristalinas muito finas, hidraulicamente inativas e não pozolânicas, de sílica (teor de SiO_2 cristalina maior do que 99% e superfície específica Blaine de $4.000 \text{ cm}^2/\text{g}$) e de carbonato (teor de CaCO_3 cristalino maior

que 95% e Blaine de $3.500 \text{ cm}^2/\text{g}$). Os cristais resultantes, ampliados em microscopia eletrônica de varredura (SEM), têm formas irregulares e tamanhos na faixa entre 1 e $20 \mu\text{m}$, com morfologia semelhante à dos grãos de cimento. A análise de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) confirma a presença de cálcio, oxigênio, silício, magnésio, alumínio e potássio. Este espectro é comparável ao de um cimento Portland comum, com exceção do pico de enxofre levemente maior.

Ambas as partículas cristalinas de sílica (carga eletrostática negativa) e de carbonato (carga eletrostática positiva) estimulam diretamente as reações de hidratação, por serem centros de nucleação para o hidróxido de cálcio (CH), agindo como “cristais-semente”. Como resultado, aparece uma camada dupla difusa de íons, mais comprimida sobre o aditivo cristalino, devido ao aumento do potencial Zeta² das cargas eletrostáticas de íons positivos (Ca^{2+}) e íons



² POTENCIAL ZETA É UMA MEDIDA DA MAGNITUDE DE REPULSÃO OU DA ATRAÇÃO ELETROSTÁTICA OU DAS CARGAS ENTRE PARTÍCULAS, INFLUENCIA O PROCESSO DE NUCLEAÇÃO, CONDUZINDO AS PARTÍCULAS DE “CRISTAIS SEMENTE” EM CRISTAIS MAIORES DOS PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO DE C-S-H, ETRINGITA E CARBONATO DE CÁLCIO.



► **Figura 6**
 Diagrama traduzido de Rahhal et al (2012) da hidratação do cimento Portland estimulado por partículas cristalinas de sílica e de carbonato

negativos (OH⁻), originadas da hidratação do grão de cimento Portland, com o consequente aumento da floculação e aumento da taxa de precipitação de cristais de portlandita (CH), gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases etringita (AFt) e monossulfato de alumínio (AFm), conforme diagrama tradu-

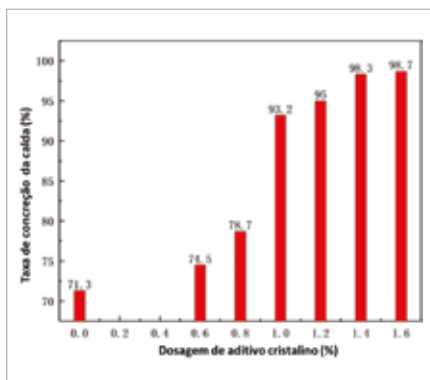
zido de Rahhal (2012), mostrado nas Figura 5 e 6.

A intercalação de ácidos carboxílicos (-COOH⁻) sobre a camada dupla difusa de nuvens de íons positivos (Ca²⁺) e íons negativos (OH⁻), em torno da estrutura dos aditivos cristalizantes, resultando em um aumento significativo do potencial Zeta das cargas eletrostáticas, faz com que a capacidade de dupla troca catiônica de seus íons intercalares de cálcio (Ca²⁺) por íons de sódio (Na⁺) ou potássio (K⁺) seja mais versátil e facilmente obtida, proporcionando maior capacidade “quelante” para aprisionar íons no composto de recristalização, bem como maior poder de dispersão da partículas do aditivo cristalizante através da porosidade do concreto. Nesse processo, o aditivo cristalizante induz uma reação química que produz um efeito de dissolução e recristalização dos subprodutos da hidratação do cimento, formando nas fissuras e poros do concreto uma nova estrutura de cristais não solúveis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita (C₆ASH₃₂) e carbonato de cálcio (CaCO₃) (Figura 6) [1].

to da calda de cimento (Figura 8), sendo propriedade inversa à exsudação de água.

A caracterização por tomografia computadorizada da microestrutura de uma matriz de brita preenchida com calda de cimento, com aditivo cristalizante em diferentes dosagens e idades de cura, onde foi escaneada a distribuição dos poros e a porosidade, mostra uma estrutura mais compacta e refinada conforme ilustrado na Figura 9 – (a) imagens de amostras com concentrações de aditivo cristalizante de 0%, 0,8%, 1,2% e 1,6% na idade de cura de 7 dias; (b) imagens de seção de amostras com concentrações de 0 a seguir %, 0,8%, 1,2% e 1,6% na idade de cura de 7 dias.

Podem ser observado que, com o aumento da dosagem do aditivo cristalizante, a permeabilidade da matriz de brita preenchida com calda de cimento se reduz (Figura 10). Para aplicações práticas de grauteamento geotécnico, recomenda-se o preenchimento da estrutura na matriz com outros componentes, como areia, para que e a quantidade de poros diminua. Isto torna possível que um alto selamento seja possível em doses menores de cristalizador, como 0,8%.



► **Figura 7**
 Taxa de concretagem da calda de cimento com aumento da concentração de aditivo cristalizante (Zheng 2019)

4. CALDA DE CIMENTO COM ADITIVO CRISTALIZANTE

Uma série de ensaios foi realizada para investigar os efeitos do aditivo cristalizante sobre a viscosidade, tempo de pega, taxa de concretagem, permeabilidade e resistência à compressão de uma calda de cimento [2]. Não foi observado efeito sobre a viscosidade e o tempo de pega, mas a taxa de concretagem aumentou significativamente em 98,7% com dosagem de 1,6% do aditivo (Figura 7). A taxa de concretagem é definida como a taxa de volume de sólidos após 24 horas do endurecimen-



► **Figura 8**
 Taxa de concretagem da calda de cimento aditivado com 0%, 0,6%, 0,8%, 1,0%, 1,2%, 1,4% e 1,6% de aditivo cristalizante após 24 h (Zheng, 2019)



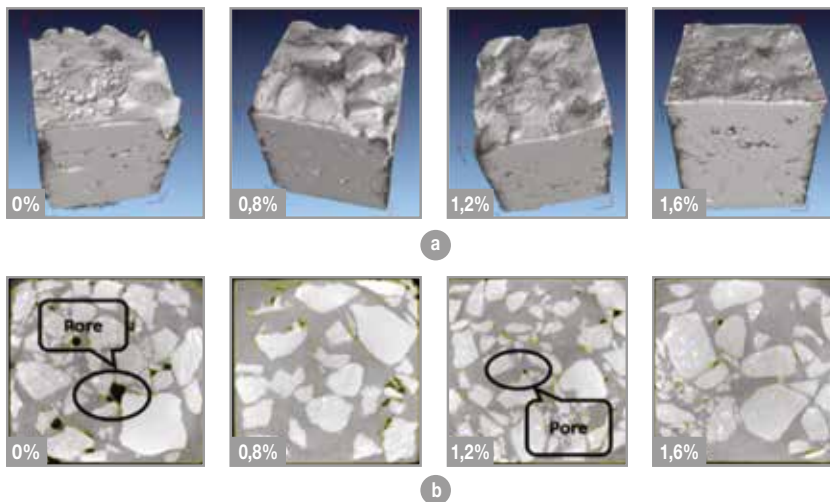


Figura 9
Imagens de tomografia computadorizada da matriz de brita preenchida com a calda de cimento com diferentes concentrações de aditivo cristalizante: (a) na idade de cura de 7 dias; (b) imagens da seção na idade de cura de 7 dias

5. UTILIZAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO AUTOCICATRIZANTE EM TÚNEIS

Um volume de 33.000 m³ de concreto projetado “engenheirado” com aditivo cristalizante, com capacidade autocicatrizante autônoma, foi aplicado em toda a espessura do

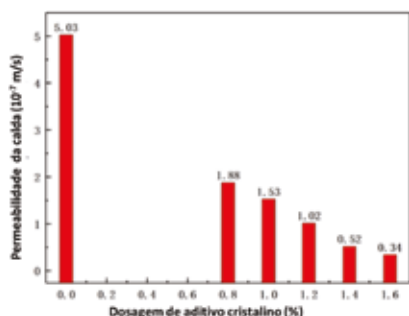


Figura 10
Permeabilidade da matriz de brita preenchida com a calda de cimento com diferentes concentrações de aditivo cristalizante

revestimento primário e na metade da espessura do revestimento secundário

dos túneis e galerias nos Tramos 4 e 1 da Linha 3 do Metrô de Santiago do Chile, entre as estações Fernando Castillo Velasco e Los Libertadores (9). O primeiro trecho da nova Linha 3 do Metrô recebeu seus primeiros passageiros ao final de 2017. Com investimentos de US\$ 1,72 bilhões, 18 estações em 21,7 km de trilhos, a Linha 3 foi concluída em 2019 e conectará a parte norte de Santiago (Huechuraba) com o centro da cidade, o distrito comercial central e a parte oriental da cidade de Santiago. Atualmente, o Metrô de Santiago mantém cinco linhas com 108 estações e um comprimento total de ferrovia de 103 km.

O concreto projetado possui vários ensaios para caracterizar e determinar as diferentes propriedades inerentes à sua especificação e desempenho. No entanto, o estudo de permeabilidade é imprescindível, a fim de prever, em algum grau,



Figura 11
O aditivo cristalizante foi utilizado para compor mais de 33.000 m³ de concreto projetado como a solução de impermeabilização para os túneis e estações da nova Linha 3 de Metrô de Santiago do Chile, durante a fase inicial de construção

► Tabela 2 – Dosagem do concreto projetado

Componentes	Peso (kg/m ³)	Massa específica (kg/m ³)	Volume (L/m ³)
Cimento Portland pozolânico de alta resistência	430	3	143,2
Água	200	1	200
Areia grossa (Lira)	1555	2,69	578,0
Sílica ativa (Elken)	21,5	2,22	9,7
Aditivo cristalizante 0,8% (Penetron Admix)	3,44	1,25	2,7
Controlador de hidratação 0,45% (Delvo Stabilizer)	1,93	1,09	1,8
Superplastificante 0,7% (Viscocrete 5100)	3	1,09	2,8
Acelerador de pega 7% (Normet Tamshot 70)	30,1	1,40	21,5
Ar incorporado (4%)	–	–	40
	2.245 kg/m ³		1.000 L

seu comportamento em relação à corrosão de fibras, armaduras, malhas, arcos e todos os tipos de elementos de aço.

Os componentes da dosagem do concreto projetado utilizado na Linha 3 do Metrô de Santiago são descritos na Tabela 2 e atendem aos requisitos para uma projeção técnica robotizada do concreto, comumente utilizada na construção de túneis subterrâneos no

Chile. A aplicação do material foi feita através de um processo pneumático de alta velocidade sobre o substrato, para garantir uma compactação suficiente.

Foram realizados extensos testes de campo para comparação de três marcas de cimento. Com base nos resultados de resistência à compressão, a dosagem requereu aditivos químicos, tais como:

- Aditivo cristalizante, para garantir o

selamento do concreto à penetração de água e outros líquidos, tanto na pressão negativa quanto na positiva, além de proteger sua estrutura contra a deterioração pela ação de fatores ambientais adversos;

- Aditivo controlador de hidratação, para aumentar o tempo de pega do cimento em até 72 horas, facilitando as operações de bombeamento e ajudando a eliminar as juntas frias entre as faixas de projeção do concreto;
- Aditivo superplastificante, para facilitar as operações de bombeamento, pois torna o concreto mais fluido e coeso para o transporte através do mangote até o bico do projetor, onde é adicionado o aditivo acelerador de pega;
- Aditivo acelerador de pega e endurecimento, para atender às exigências das classes de resistência J1, J2 e J3 das diretrizes para concreto projetado, colaborando ainda para diminuir os níveis de reflexão e de formação de poeira.

5.1 Efeito do uso do aditivo cristalizante no concreto projetado em túneis

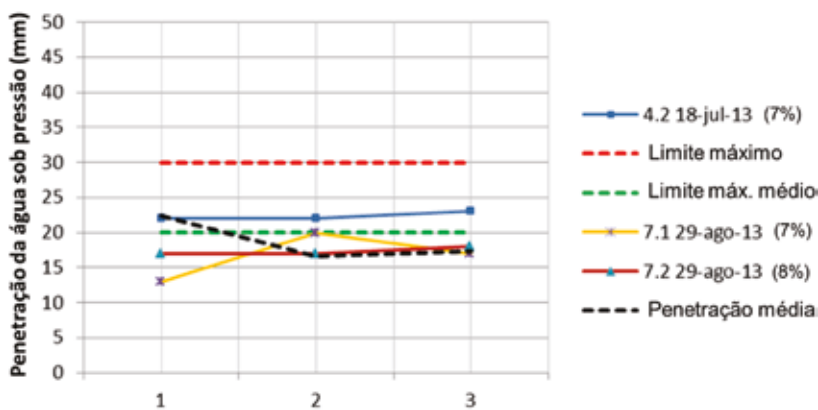
As especificações técnicas para o concreto projetado para a Linha 3 do Metrô de Santiago do Chile exigiram o desenvolvimento de resistências dentro das classes³ J2 e J3 (Figura 12), com tempo de retenção de abatimento de quatro horas e queda máxima de 25% na resistência em relação ao traço de controle sem acelerador. Esse foi um desafio particularmente difícil, considerando que todos os cimentos locais são cimentos compostos, o que geralmente não ajuda no desenvolvimento inicial da resistência.



► **Figura 12**
Resultado da conformidade do traço do concreto projetado nas classes J2 e J3 (para teores de aditivo acelerador de pega de 7 a 8% em relação à massa de cimento)

³ CLASSES J1, J2 E J3 SÃO REQUISITOS DA RESISTÊNCIA À BAIXA IDADE, QUE INDICAM QUANDO O CONCRETO PROJETADO PRECISA SER APLICADO COM INFILTRAÇÕES E NA OCORRÊNCIA DE TENSÕES DEVIDAS A ATIVIDADES DE ESCAVAÇÃO.





► **Figura 13**
Penetração de água sob pressão em mm no concreto projetado em painel



► **Figura 14**
Controle da permeabilidade das amostras extraídas em mm de penetração de água ao longo de 26 meses conforme a evolução da obra do túnel

A durabilidade do concreto projetado foi avaliada pelo ensaio de penetração de água sob pressão no concreto (Figura 13). Esta abordagem permitiu que penetrações de água menores que 30 mm fossem validadas para a análise de vida útil do concreto projetado.

Independentemente dos resultados obtidos, a partir da data do início da dosagem do aditivo cristalizante no teor

de 0,8% sobre o consumo de cimento, foi possível notar uma sensível redução da penetração de água ao longo de 26 meses (Figura 14).

6. CONCLUSÕES

Este artigo objetivou discutir a tecnologia do concreto projetado autocicatrizante como sistema impermeabilizante de túneis construídos em NATM, tendo

como referência a obra da Linha 3 do Metro de Santiago do Chile (Figura 11).

A metodologia para a escolha e dosagem de produtos deve atender a uma base técnica para julgamento da compatibilidade entre os materiais (matriz de agregados, composição química do cimento, efeitos colaterais entre aditivos, etc), elementos e processos destinados aos sistemas de impermeabilização dos túneis. Atualmente, existe grande quantidade de produtos que os fabricantes da indústria química de construção lança no mercado ano após ano. Diante dessa realidade, fica clara a necessidade de consolidação de critérios e metodologias de dosagem dos concretos autocicatrizantes e escolha desses novos produtos, até porque podem ocorrer resultados com diferenças significativas em função das composições químicas dos diferentes aditivos e dos diferentes cimentos passíveis de serem aplicados. ◀



► **Figura 15**
Aspecto geral do túnel, com revestimento em concreto projetado com aditivo cristalizante – Linha 3 do Metrô de Santiago do Chile

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Rahhal, V. Bonavetti, L. Trusilewicz, C. Pedrajas e R. Talero, "Role of the filler on Portland cement hydration at early ages," *Construction and Building Materials*, p. 82–90, 2012.
- [2] K. Zheng, X. Yang, R. Chen e L. Xu, "Application of capillary crystalline material to enhance cement grout for sealing tunnel leakage," *Construction Building Materials*, pp. 497-505, 2019.

Projeto Stuttgart 21: inovação em construção de túneis

ADRIANO DORNFELD SALDANHA – GERENTE COMERCIAL

SEGMENTO TÚNEIS MC – BAUCHEMIE

I. INTRODUÇÃO

Stuttgart 21 (ou simplesmente S21) é um dos maiores projetos de engenharia atualmente em curso na Europa, com diversas obras realizadas na cidade alemã de Stuttgart e em seus arredores, que tem, entre muitos objetivos, a meta de otimizar a infraestrutura local de transporte. Uma das características mais marcantes do projeto é a previsão de ligações entre a cidade, lar de montadoras consagradas como a Mercedes Benz e a Porsche, e vias de trens transcontinentais ligadas aos cantos mais remotos da Europa. Quando o S21 estiver concluído, Stuttgart vai se tornar um dos hubs ferroviários mais importantes e modernos do continente, além de um centro industrial ainda mais relevante.

No segundo semestre de 2019, o S21 atingiu um novo marco: a conclusão da perfuração dos túneis ferroviários Filder e Albvorland, com direito à cerimônia oficial e à presença de cidadãos, operários, engenheiros, autoridades e políticos. O fim da perfuração representou a conclusão de um trabalho de quase cinco anos em que colaboradores de diversos setores ajudaram a concretizar etapas cruciais de um dos projetos de infraestrutura mais monumentais da atualidade.

2. MEGAPROJETO ALEMÃO

Com orçamento estimado em 8 bilhões de euros, as obras de transporte

e desenvolvimento urbano do S21 pretendem, entre outros objetivos, transformar a região de Stuttgart num hub ferroviário internacional de transporte de mercadorias e pessoas. O projeto prevê a construção de 100 km de trilhos compatíveis com trens de alta velocidade. O trecho terá um sistema de gestão de tráfego inteligente e três estações construídas dentro dos mais modernos padrões já estabelecidos para edificações ferroviárias. A ampliação da infraestrutura ferroviária deve estimular, não só a atividade industrial, mas o desenvolvimento da região central de Stuttgart. A expectativa é que a área central da cidade – onde ficam os grandes prédios de escritórios e residenciais de alto padrão – seja ampliada em 40% com novas construções nas adjacências da linha férrea que passa a servir a região. A empresa responsável pelo projeto é a concessionária Deutsche Bahn. O governo federal alemão, o governo da província de Baden-Württemberg, a autoridade de trânsito de Stuttgart, a administração municipal, a concessionária aeroportuária Flughafen Stuttgart GmbH e a União Europeia são as financiadoras do S21. Além dos túneis Filder e Albvorland, o S21 também inclui uma série de outros subprojetos, entre eles: o anel ferroviário de Stuttgart, a nova linha férrea Stuttgart-Ulm – que terá vários túneis – e o rebaixamento da estação ferroviária central da

cidade. Os dois primeiros projetos têm grande envolvimento da MC.

3. ALTA DEMANDA EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

A perfuração dos túneis Filder e Albvorland foi realizada com um TBM (*Tunnel Boring Machine* – máquina tuneladora, usada para escavação de túneis com seção transversal circular, apreciada por sua versatilidade, segurança e eficiência em diversos tipos de solos e rochas) do tipo EPB (*Earth Pressure Balance* – tipo de tuneladora que usa um método no qual o material escavado é utilizado para apoiar a face do túnel, enquanto está sendo condicionado com espuma ou lama e outros aditivos para torná-lo maleável e transportável; o material entra na máquina por um parafuso de rosca sem fim que permite que a pressão na face do TBM permaneça equilibrada, sem o uso de lama). As condições geológicas do solo não permitiram que as linhas férreas do Filder pudessem ser posicionadas numa única cavidade, como na maioria dos túneis. Os engenheiros tiveram que escavar dois túneis singelos, um para cada via. Cada um tem 10,87 m de diâmetro, com profundidade variando entre 20 e 220 m abaixo da linha do solo. A extensão total do Filder é de 9.468 m, o que faz dele o maior túnel do S21. Quando concluído, será



também o maior túnel singelo ferroviário da Alemanha e a terceira estrutura subterrânea mais longa do país.

O túnel Alborland foi construído com técnicas similares às do Filder. Também nele há dois túneis singelos, de 10,87 m de diâmetro cada. A extensão é próxima de 8.000 m e a profundidade varia entre 8 e 63 m. O terceiro maior túnel do S21 é o Bossler, construído na região de Jura, precisamente na cidade de Aichelberg, e totaliza 8.806 m de extensão. Também são dois túneis singelos, com 10,87 m de diâmetro e profundidade máxima de 280 m. O Bossler integra a ferrovia que liga Wendlingen a Ulm. Quando pronto, será uma das obras de engenharia mais complexas da Alemanha pelos desafios que impôs a seus construtores.

4. DESAFIOS GEOLÓGICOS

Os desafios de construção desses túneis foram muitos. O Filder, por exemplo, foi perfurado em boa parte de sua extensão ao longo de uma formação de rocha sedimentar com alto teor de anidrido. Esse tipo de formação rochosa é comum em várias partes do mundo e tem alta prevalência nos planaltos ao sul de Stuttgart. O anidrido representa um desafio extra à construção de túneis porque, em contato com a água, expande-se em mais de 60%, provocando uma pressão enorme sobre a estrutura do túnel. A pressão é tão forte que pode tanto danificar o túnel, como provocar movimentações de solo para cima, nos casos em que o túnel resiste, com potencial para inutilizar por completo construções na superfície. A perfuração do Filder no trecho de anidrido foi realizada com o TBM em modo aberto, ou seja, sem o anel de aço que protege o equipamento do contato com o solo. Havia uma proteção



Foto 1 – TBM no emboque do túnel Alborland

mínima logo atrás da cabeça de corte. Nas áreas de rocha, devido ao anidrido, o uso de injeções de consolidação de solo diluídas em água foi estritamente proibido. A técnica correta exige a injeção de grautes especiais para a estabilização do solo, seguida da montagem das aduelas de concreto. A Deutsche Bahn solicitou o desenvolvimento de um graute específico para a perfuração do Filder. Tinha de ser uma solução que eliminasse o risco de pressões sobre o túnel e de deslocamento do solo.

5. SOLUÇÃO DESENVOLVIDA PARA O S21

O consórcio ATCOST 21, responsável pela construção do Filder, solicitou o desenvolvimento de um graute especial para viabilizar a perfuração com segurança. O graute teria de contar com geopolímeros na formulação. Os geopolímeros são ligas químicas inorgânicas que se conectam umas às outras de forma similar às moléculas do cimento. Mas contém aluminossilicatos, que, em meio alcalino, dão origem a polímeros

inorgânicos. O graute especialmente desenvolvido para a ATCOST 21 tem, entre suas características, o fato de ser um produto 2 em 1: pode ser usado como um prático graute monocomponente, dependendo da aplicação, ou como bicomponente, compondo uma argamassa ainda mais potente e reativa quando misturada a um aditivo. Na camada base, utilizou-se a versão mais reagente do composto. O graute foi reforçado com agregado inerte, obtido de rochas da região, e acrescentou-se escória de alto-forno e cinza-volante, que interagem com o aditivo, deixando a mistura ainda mais resistente depois de endurecida (Tabela 1). O graute desenvolvido contém também compostos fosfatados, que interagem com a rocha anidrica evitando sua expansão. A eficácia desses compostos foi comprovada em vários testes realizados pela MC e pela construtora PORR Bau GmbH, que patentearam a tecnologia para uso em outros projetos. O produto é diferenciado por ser imune a sulfatos e extremamente resistente.

► **Tabela 1 – Componentes do graute em massa em relação ao seu volume**

Ligante	Massa em kg/m ³
Escória	200
Cinza volante	350
Água	200

Agregados	Massa em kg/m ³
Areia 0/2	850
Brita 2/8	540

Aditivos	Massa em kg/m ³
Aditivo à base de fosfatos	20
Ativador	90

6. EFICÁCIA COMPROVADA

A complexidade técnica da perfuração do Filder e a ampla cobertura dada pela mídia a cada avanço do S21 fizeram a ATCOST 21 certificar-se duplamente de que a solução proposta funcionaria. O consórcio solicitou ao Departamento de Edificações da Universidade de Aachen a realização de uma investigação geológica independente na escavação, para determinar as reações reais do anidrido que ocorreriam na camada-base do túnel a partir da injeção do graute.

O escritório de engenharia Brameshuber & Uebachs Ingenieure GmbH executou as análises ambientais solicitadas pela investigação. O Departamento de Tecnologia de Materiais de Construção da Universidade de Bochum analisou os aspectos técnicos da camada-base formada com o graute dentro dos critérios mais rigorosos atualmente estabelecidos para este método construtivo. Os testes levaram mais de dois anos para serem concluídos, o que mostra o rigor técnico das concessionárias responsáveis. Foram admitidos apenas os testes realizados

em larga escala e no solo da escavação. Só depois de tudo isso feito é que a Deutsche Bahn autorizou o emprego da solução nos túneis do S21.

Mas não demorou até que os engenheiros comprovassem o desempenho superior do graute em sua versão aditivada para a composição de camadas-base de perfuração. Mesmo com agregado granular misturado à massa, o aditivo reagente pôde ser incorporado ao graute sem grandes problemas, a partir da instalação de uma unidade de mistura auxiliar no TBM. Com isso, a execução da camada-base ocorreu sem intercorrências e segundo as rigorosas especificações do projeto. A utilização de agregado não reativo ampliou bastante a trabalhabilidade do graute, o que, por sua vez, permitiu que a perfuração fluísse de forma coordenada em cada etapa. O novo graute de injeção bicomponente provou-se flexível e eficiente nos túneis do S21 e, desde então, vem sendo cada vez mais adotado em projetos semelhantes globalmente.

7. PROPRIEDADES DE ASSENTAMENTO OTIMIZADAS

A experiência adquirida no desenvolvimento do graute especial aditivado para o túnel Filder ajudou a otimizar a versão convencional do produto, que foi utilizado com muito sucesso na perfuração do Alborland, entre Wendlingen e Kirchheim unter Teck. Nesse trecho em particular, as condições do solo permitiram ao TBM avançar mais rapidamente que no túnel Filder. A injeção do graute, portanto, precisava ser mais rápida. Era preciso otimizar as propriedades do graute monocomponente para ser utilizado nessas condições. A solução encontrada foi o desenvolvimento de um modificador de viscosidade, que foi

adicionado diretamente no bico da linha de injeção do TBM. Os testes no S21 indicaram ainda que o produto seria capaz de eliminar a ocorrência de subsidência no graute, além de otimizar o processo de acomodação e secagem. A versão customizada do graute foi aplicada de forma contínua ao longo de toda extensão de 8.000 m do Alborland.

8. EFICIÊNCIA EM CONDICIONAMENTO DE SOLO

No trajeto do túnel Filder, além de prevalência de rochas com alto teor de anidrido, o solo a ser perfurado intercalava trechos de perfil sedimentar e arenoso, com partes de argila densa e rocha dura, a combinação perfeita para o rápido desgaste das ferramentas de corte do TBM. Esse cenário demandou dos engenheiros especial atenção quanto ao condicionamento do solo. Desafio similar se apresentou na perfuração do túnel Alborland. Só que nesse túnel havia um risco adicional: o Alborland, em determinado ponto, iria cruzar com uma importante via de transporte, a Rodovia A8, apenas 8 m abaixo da linha do solo, composto majoritariamente por argila e rocha. No túnel Bossler, integrante da linha férrea Stuttgart-Ulm, nas proximidades de Alborland, um dos trechos apresentava um perfil de solo instável, com prevalência de falhas e com pontos de contato com o lençol freático, pelos quais a água se infiltrava no túnel. Nessas condições, os engenheiros foram obrigados a utilizar um TBM do tipo EPB. A couraça seria responsável por manter o solo estável à medida que a perfuração avançava, até que as aduelas de concreto fossem mecanicamente instaladas nas paredes do túnel, estabilizando a estrutura e o solo acima dela. Enquanto o TBM escavava, na parte externa da



couraça, por meio de uma série de linhas de tubos injetores, entrava em ação a chamada tecnologia de equilíbrio de pressão do solo (EPB), fundamental quanto à segurança na construção de túneis no subsolo de áreas densamente habitadas ou em formações geológicas com alta instabilidade. Nesse equipamento foi utilizado, no túnel da linha férrea Stuttgart-Ulm, a linha de agentes de condicionamento de solo e um gerador de espuma (*Cell Tube*), que propicia a formação de uma espuma estável quanto às dimensões das bolhas. Apresenta, dessa forma, um alto rendimento quanto ao consumo, exigindo uma menor manutenção no TBM e permitindo uma continuidade de perfuração mais constante.

©DBREINER_PFEISTERER



Foto 2 – Túnel Filder, no qual se observa as aduelas de concreto pré-moldado colocadas

9. LUBRIFICAÇÃO IDEAL

O agente de condicionamento de solo mais utilizado nas obras do S21 foi o *Foam Liquid*. Não agressivo ao meio ambiente, ele forma uma espuma concentrada, que se degrada biologicamente e com rapidez. O produto também apresenta um aditivo que melhora o desempenho da consolidação em solos com maior prevalência de argila, onde a probabilidade de adesão de argila pegajosa nas ferramentas de corte (efeito *clogging*) é grande. Dessa forma, ao tornar o avanço mais eficiente e diminuir o acúmulo de argila nas lâminas de corte, o produto também economiza energia, diminuindo o torque do equipamento, contribuindo para o bom andamento da velocidade da obra e para a manutenção do projeto dentro do orçamento previsto.

10. ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE DE ALTO DESEMPENHO PARA ADUELAS DE CONCRETO

As aduelas de concreto pré-moldado que compõem as paredes do

túnel Bossler foram fabricadas pela concreteira SEMPER BETON GmbH & Co. KG, integrante do consórcio ARGE PTS Bosslertunnel, com aditivos superplastificantes de alto desempenho. Esses aditivos contam com a mais moderna tecnologia de ésteres policarboxilatos, que agem na formulação de concreto para garantir superfícies de alta qualidade, diminuir a necessidade de água na usinagem e manter o processo de fabricação das peças funcional e econômico.

II. EM RESUMO...

No megaprojeto Stuttgart 21, uma série de tecnologias e sistemas de produtos da MC foram utilizados, desde soluções para consolidação do solo, passando por aditivos superplastificantes para produção das aduelas pré-moldadas, até sistemas de injeção para impermeabilização de estruturas e moderno graute sem cimento para a confecção do *backfill grout* (camada de consolidação que separa a aduela de

concreto do solo). Essas tecnologias e sistemas revelaram-se fundamentais ao sucesso do projeto e à satisfação do cliente com os resultados, possibilitando que muitos desafios fossem superados e que as construções avançassem sem intercorrências. 🏗️

FICHA TÉCNICA

Projeto
Stuttgart 21

Construtoras
Porr, Hinteregger & Sohne,
Ostu-Stettin, Swivetelsky JV

Concreteira
SEMPER BETON GmbH & Co. KG

Aditivos químicos
MC-Montan Drive FL 04,
MC-Montan Drive FL 06,
Cementless MC-Montan Grout,
MC-PowerFlow,

Máquinas TBM
Herrenknecht

Avaliação da resistência ao fogo do concreto para revestimento de túneis

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO | ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR ASSOCIADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ANTONIO FERNANDO BERTO – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRE

LABORATÓRIO DE SEGURANÇA AO FOGO E A EXPLOÇÕES DO INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

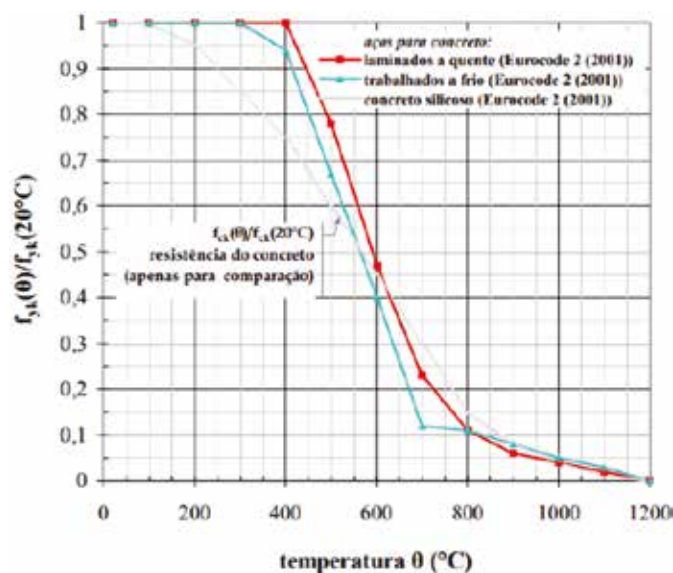
RESUMO

concreto, o aço e as fibras deterioram-se sob a ação do fogo, perdendo resistência e módulo de elasticidade. O incêndio pode provocar o lascamento explosivo do concreto em revestimento de túneis, fenômeno de causas complexas, difícil de ser modelado, mas que pode ser

reduzido com o uso de fibras de polipropileno. Em razão disso, para a homologação desses concretos, são realizados ensaios de resistência ao fogo. Neste trabalho apresenta-se uma abordagem para avaliação de concretos para revestimento de túneis, por meio de ensaios de resistência ao fogo, para homologação de seu emprego.

I. INTRODUÇÃO

Todas as estruturas devem ser projetadas a fim de se garantir sua segurança frente a múltiplas situações possivelmente críticas que podem ocorrer durante sua vida útil. Dentre essas situações está a ocorrência de um incêndio. O aumento de temperatura causa danos ao concreto e ao aço, afetando negativamente suas propriedades mecânicas. Da mesma forma que os materiais podem ter sua resistência à compressão verificada por um estudo de dosagem prévio, os efeitos do aumento de temperatura no concreto podem ser verificados antes da execução da obra por meio de ensaios de resistência ao fogo realizados em fornos apropriados para esse fim. Simula-se nesses fornos, por meio de queimadores industriais a gás, a elevação de temperatura que será possivelmente alcançada numa situação de incêndio. Em túneis, devido às condições de enclausuramento presentes e às cargas térmicas que trafegam através deles, as temperaturas podem facilmente ultrapassar os 1000° C, como já verificado em



► **Figura 1**
Redução percentual da resistência do concreto e de aços em função da temperatura do material [6]

incêndios reais que ocorreram, por exemplo, nos túneis Mont Blanc [1] e São Gotardo [2]. Neste trabalho, busca-se apresentar uma abordagem de avaliação do comportamento do concreto de revestimento de túneis em incêndio, por meio de ensaios de resistência ao fogo que devem ser empregados para a homologação da tecnologia. Ou seja, devem ser realizados previamente à execução da obra, de modo a garantir a segurança da estrutura.

2. EFEITOS DO FOGO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Cada fase do concreto é afetada de forma diferente durante um incêndio. Segundo Serafini et al. [3], a matriz cimentícia sofre decomposição devida à liberação combinada de água e de alguns produtos de hidratação do cimento Portland. Alguns agregados apresentam expansão térmica incompatível com a variação de volume da pasta, causando, portanto, microfissuras na matriz cimentícia. Este processo acaba por provocar perdas de resistência mecânica e de módulo de elasticidade do material, tão mais intensas quanto maiores forem as temperaturas atingidas, conforme ilustrado na Figura 1.

No caso do concreto ser reforçado com fibras de aço, algo frequente na execução de túneis, a deterioração também está associada à perda do encruamento original do material que compõe a fibra. Caso o tipo de reforço seja o de aço convencional, essa deterioração pode ser agravada pela maior capacidade de condução das barras contínuas e pelo efeito de dilatação do aço que pode

romper o cobrimento. Outro tipo de reforço que tem sido aplicado no revestimento de túneis são as macrofibras poliméricas que, no caso da ocorrência de um incêndio, são completamente degradadas nas regiões do revestimento que ultrapassar os 200° C durante um incêndio, proporcionando uma perda total da capacidade de reforço nessa região [4]. O fato de as fibras degradarem com o aumento da temperatura também pode ser aproveitado como um fator de proteção da estrutura, porque é possível utilizar microfibras de polipropileno para a proteção do revestimento de túnel contra o lascamento explosivo [5]. Esta proteção é essencial para a garantia da segurança do túnel em situação de incêndio e é um dos comportamentos que devem ser verificados para esta solução, conforme descrito a seguir.

3. LASCAMENTO DO CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O lascamento ou *spalling* do concreto está atrelado à existência de gradientes de temperatura no material [7]. Estes gradientes podem gerar um aumento da pressão de vapor nos poros do concreto, que ocorre devido à evaporação da água que se encontra difundida em meio à matriz cimentícia. Esses vapores, encontrando dificuldade para serem liberados ao ambiente, criam tensões tão mais intensas quanto menor for a porosidade do concreto, o que corresponde a um aumento do risco em concretos de alta resistência [8]. Esse fenômeno inicia-se nas camadas mais externas e se propaga progressivamente, afetando as zonas mais internas gerando a rup-

tura da camada externa do material conforme ilustrado na Figura 2. A severidade do lascamento é crítica quando o mesmo é explosivo e se agrava pelo fato de, normalmente, ocorrer na primeira meia hora de um incêndio. Essa situação se confirma em diversos ensaios de resistência ao fogo de peças de concreto realizados no Laboratório de Segurança ao Fogo e Explosões (LSFEx) do IPT (Figura 3). Outra explicação de causa do lascamento está associada à ocorrência de tensões térmicas no material devido à existência de gradientes térmicos ao longo das camadas do concreto [9]. Alguns autores atribuem o lascamento à ação combinada dos dois mecanismos descritos, ocorrendo simultaneamente [8] [10]. Isto torna complexo o fenômeno do lascamento [11] e dificulta a modelagem [10] e parametrização do comportamento do material nessas condições. Por consequência, a solução encontrada é a realização de ensaios que avaliem o desempenho do material exposto ao calor gerado em incêndios.

Uma forma efetiva de controlar a ocorrência de lascamento é através



► **Figura 2**
Exemplo de perda de camada superficial do concreto por efeito de lascamento explosivo após realização de ensaio de exposição do concreto a chama [8]



► **Figura 3**
Elemento de concreto que sofreu lascamento explosivo durante ensaio de resistência ao fogo no forno do LSFEx, no IPT

do uso de microfibras de polipropileno (PP), o que dá ao compósito um mecanismo de funcionamento muito interessante. Essas microfibras PP apresentam ponto de fusão em torno de 140 aos 170° C [8]. Durante um incêndio, as temperaturas superficiais nos materiais facilmente ultrapassam esse valor nos primeiros minutos, fazendo com que essas fibras entrem em fusão, deixando vazios em seu lugar, que na verdade se tornarão “caminhos” para que os vapores gerados pelo aumento de temperatura possam ser dissipados mais facilmente para fora da matriz cimentícia [11]. Usualmente os teores de microfibra PP recomendados para prevenção de lascamento explosivo estão acima de 2 kg/m³. No entanto, este teor pode ser reduzido, uma vez comprovada a segurança através dos ensaios de homologação do material, onde se verifica a ocorrência ou não do lascamento.

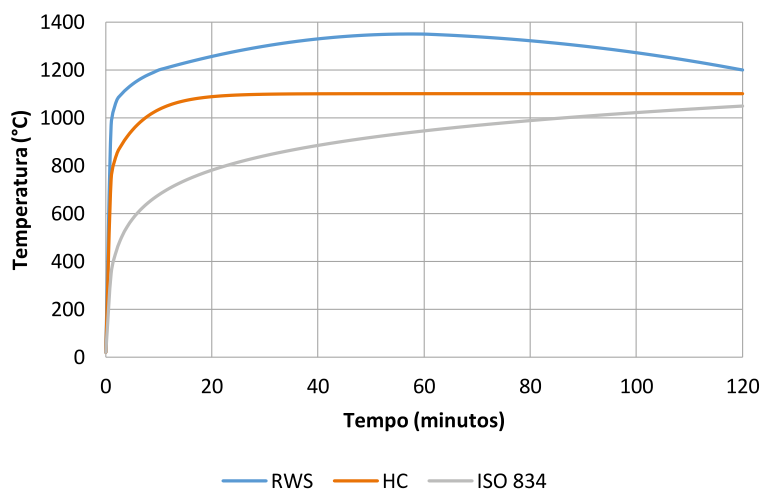
4. AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE TÚNEIS EM ALTAS TEMPERATURAS

Diante das condições descritas no item anterior, evidencia-se a necessidade da homologação, para a situação de incêndio, de revestimentos de concreto, aplicados em túneis, reforçados tanto com armadura quanto com fibras [12]. Trata-se de uma abordagem que prevê a execução de ensaios de resistência ao fogo em corpos de prova de concreto na forma de placas. Uma das principais referências nesse sentido é o procedimento de preparação, moldagem e ensaio apresentado no documento “*Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings*”, publicado pela organização internacional EFNARC [13].

Esse procedimento é indicado para realização de estudos iniciais sobre a segurança contra incêndio da obra, associado à fase de projeto do sistema de revestimento de um túnel e, conseqüentemente, conjugado

com a definição das soluções estruturais. É importante que isso seja realizado nessa etapa para que quaisquer problemas encontrados durante os ensaios possam ser sanados antes que se defina integralmente as soluções do projeto, de modo a evitar-se aumento dos custos e retrabalhos. Os estudos iniciais devem ser feitos com placas de pequenas dimensões (400 mm x 400 mm) e buscam verificar o melhor conteúdo de fibras a ser incorporado ao concreto para garantir proteção passiva. Ensaios de homologação devem sempre ser realizados em escala maior, com placas de concreto de 1800 mm x 1800 mm, reproduzindo as soluções apontadas como mais adequadas no estudo com as placas menores, realizado na etapa anterior.

Segundo o documento de referência adotado, o ensaio em escala maior deve ser executado em duas placas, submetidas a condições distintas de condicionamento, semelhante ao que é plausível de



► **Figura 4**
Curvas de temperatura mais significativas em ensaios de resistência ao fogo



ocorrer no revestimento de um túnel real. Recomenda-se o condicionamento do corpo de prova em ambiente com umidade relativa acima de 90% para a condição de alta umidade e de 50% para a condição de baixa umidade.

Nesse sentido, os ensaios devem ser realizados em corpos de prova que reproduzam a solução adotada, que pode ser na forma de proteção integral ou de revestimentos complementares, ou apenas da camada associada ao revestimento secundário. A avaliação na forma de proteção integral é normalmente associada aos revestimentos de túneis TBM (*Tunnel Boring Machine*) que utiliza anéis segmentados. A avaliação do revestimento secundário é associada aos túneis NATM (*New Austrian Tunneling Method*), no qual se utiliza normalmente o concreto projetado para a execução do revestimento. Quando o túnel não possui proteção passiva original, camadas complementares, normalmente realizadas por jateamento, podem ser aplicadas e, por sua vez, também devem ser avaliadas para verificar a efetividade da proteção passiva da estrutura. As espessuras das placas de concreto destinadas às avaliações laboratoriais (ensaios de resistência ao fogo) dependerão do tipo de proteção contra incêndio adotada. Para situações com proteção passiva incorporada à estrutura com proteção integral, a espessura deve ser de, no mínimo, 250 mm. Nos casos de revestimentos secundários ou complementares, deve-se produzir as placas em duas camadas, sendo a primária com espessura de 200 mm, que deve receber a camada secundária ou de proteção passiva complementar com

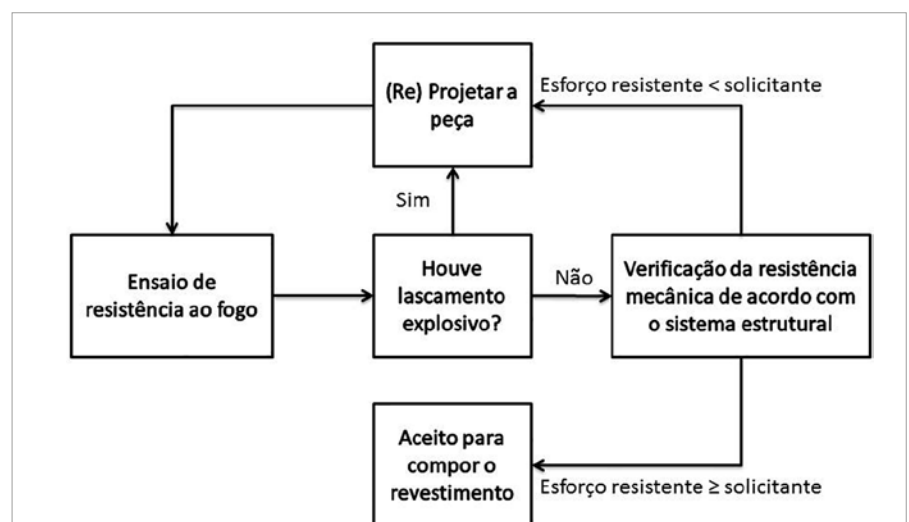
► Tabela 1 – Definições de tipos de lascamento (adaptado de [8] [10])

Tipo de lascamento	Som	Intensidade	% vol. lascado	Dano
Superficial grau 1	Estalido	Baixa	Até 1%	Baixo
Superficial grau 2	Estalo	Média	1-10%	Médio
Explosivo	Estampido	Forte e alta	> 10%	Alto

a espessura definida em projeto e aplicada nas mesmas condições que serão utilizadas na obra.

Outro ponto importante diz respeito à curva de temperatura a ser utilizada no ensaio. Na Figura 4 são apresentadas as três curvas mais recomendadas. A curva ISO 834, chamada de curva padrão de elevação de temperatura, é a mais usada internacionalmente, porém é recomendada para simular incêndios em edificações convencionais, onde a carga de incêndio é predominantemente composta por materiais celulósicos e poliméricos, e não apresenta a severidade condizente com os incêndios que historicamente ocorreram em túneis. A curva

HC é bem mais severa que a curva padrão, pois simula incêndios em hidrocarbonetos. A curva RWS, também chamada curva de túneis, simula um mesmo tipo de incêndio que a curva HC, porém em locais fechados, onde a dissipação de calor é restrita e, portanto, atinge temperaturas maiores. A curva RWS requer fornos mais potentes e resistentes às altíssimas temperaturas, os quais ainda não existem no Brasil. Logo, recomenda-se a utilização, ao menos, da curva de temperatura de hidrocarbonetos (HC). Essa curva prevê que o forno atinja 1150 °C dentro dos primeiros minutos do ensaio e gera um gradiente de temperatura importante no concreto, dando



► Figura 5 Fluxograma de verificação do revestimento de túneis de concreto sujeitos a incêndio [12]

condições, portanto, de que o lascamento explosivo se manifeste, caso a solução não tenha sido adequadamente concebida, ao mesmo tempo que simula apropriadamente, nos primeiros minutos de ensaio, os incêndios que podem ocorrer nos túneis.

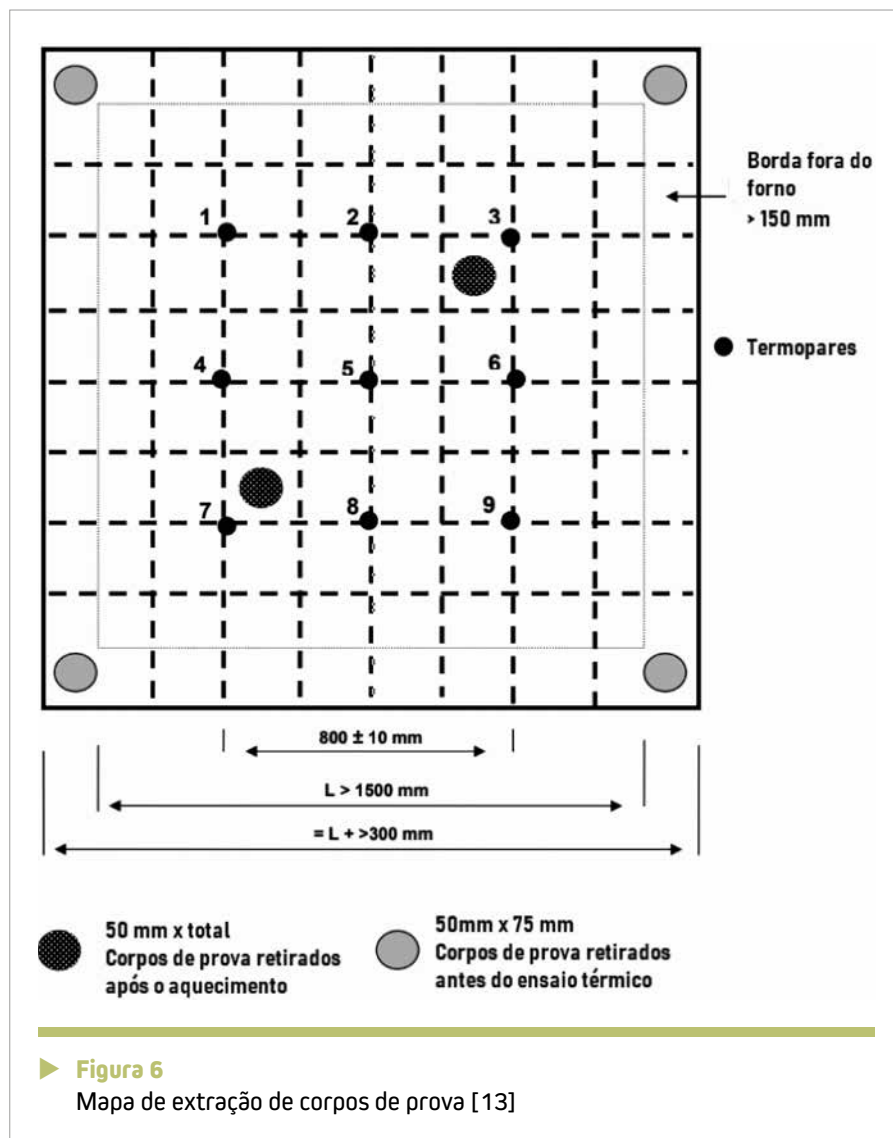
Naturalmente, a temática mais importante dessa avaliação corresponde à verificação da ocorrência do lascamento explosivo, apresentado anteriormente como o efeito adverso mais crítico quando comparado aos outros efeitos. Ou seja, em qualquer análise, a ocorrência de lascamento explosivo deve ser o primeiro fator a ser verifica-

do durante e após um ensaio de resistência ao fogo [12], e o mesmo pode ser classificado segundo os critérios apresentados na Tabela 1. Com base nisso, foi elaborado o fluxograma de ensaio apresentado na Figura 5.

Uma abordagem apresentada por Nince [8], com base nos estudos iniciais de Khoury e Majorana [10], para caracterizar o lascamento explosivo, considera que esse fenômeno ocasiona perdas de mais de 10% do volume original do elemento que foi inserido no forno e faz com que os técnicos responsáveis pelo ensaio ouçam um estouro alto e forte no ambiente próximo ao forno.

Considerando-se a classificação dos tipos de lascamento e a abordagem exposta na Figura 5, quando for ouvido durante um dos ensaios de resistência ao fogo um barulho de estouro forte e alto, e, após o ensaio, for constatado que o material perdeu, pelo menos, 10% do volume inicial que foi colocado no forno, deve-se prontamente rejeitar a solução ensaiada e projetar novamente o sistema de proteção contra incêndio incorporado ou adicionado ao revestimento. Isto porque, nessa situação, um túnel construído com esse revestimento, na ocorrência de um incêndio, teria grande probabilidade de desenvolver o mesmo tipo de problema, com danos potencialmente catastróficos.

É importante também destacar que o estudo de Nince [8] foi desenvolvido com corpos de prova comparativamente menores, em relação ao tamanho de placas dos ensaios proposto pela EFNARC, sobretudo no que diz respeito ao ensaio de placas grandes. Em ensaios de escala maior, como o volume da placa é bem maior, poderia possivelmente ocorrer danos profundos através da espessura da placa, porém de forma localizada, não abrangendo um volume suficiente para ser considerado lascamento explosivo pela definição anterior. Por essa razão, nesses ensaios em escala maior, deve-se restringir o critério anteriormente proposto somente à ocorrência de estouro alto e forte durante o ensaio, e após a retirada do forno, o responsável técnico do ensaio deverá realizar uma análise na placa confirmando ou não a ocorrência do lascamento explosivo. No futuro, espera-se que possam ser realizados estudos mais aprofundados na ocorrência desse fenômeno em placas de grandes dimensões,



presumivelmente aprimorando critérios que envolvam não somente o estouro e volume de perda de material, mas também a área da superfície lascada e a profundidade do dano.


Caso o lascamento explosivo não tenha ocorrido, passa-se à verificação da resistência residual do elemento construtivo. Isso deve ser feito por meio da retirada de corpos de prova em locais específicos da placa, os quais geralmente serão ensaiados à compressão. Na Figura 6 está apresentado um mapa completo da posição dos termopares na placa de ensaio e dos corpos de prova que devem ser retirados antes e depois do ensaio resistência ao fogo. Isso permite que se avalie a redução percentual da resistência do concreto após a deterioração pelo aumento de temperatura, além da própria resistência residual que deverá ser comparada àquela exigida em projeto, considerando também a redução da seção resistente.

Deve-se destacar que a análise da resistência residual é um processo trabalhoso. A retirada de corpos de prova por si só não é de fácil execução, especialmente em placas que já se encontram danificadas devido aos efeitos do fogo. Isso é ainda dificultado pela existência de gradientes de temperatura na seção, o que culminará também na existência de gradientes de resistência. Portanto, esses resultados devem ser objeto de um estudo mais aprofundado por parte dos projetistas, a fim de que se garanta a segurança do revestimento. Após a realização completa dessa análise e confirmação dos requisitos de segurança, o material pode ser aceito para compor o revestimento do túnel para o qual foi projetado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vale ressaltar que incêndios em túneis, caso progridam sem controle, são catastróficos, podendo causar danos imensuráveis ao túnel e à

região do entorno, especialmente em meios urbanos, devido ao risco de colapso da construção e o efeito que isto pode trazer para as construções existentes na região lindeira. Sem contar o grande risco de ferimentos, intoxicação e mesmo de morte das pessoas que estiverem trafegando no túnel no momento do incêndio.

Nesse sentido, o lascamento explosivo pode ser apontado como uma condição crítica em relação aos outros efeitos de deterioração. Isto porque a sua ocorrência diminui a espessura resistente do túnel e elimina a ação de proteção das camadas superficiais em relação ao restante do revestimento. O fato de ser um fenômeno mais súbito, podendo ocorrer logo nos primeiros minutos do incêndio, faz com que as avaliações prévias à execução da obra sejam essenciais para a garantia da segurança das estruturas. Neste sentido, ao menos a curva HC deve ser utilizada para a análise desse fenômeno. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AFAC – TUNNEL FIRE SAFETY ISSUES COMMITTEE. Fire Safety Guidelines for Road Tunnels, Australasian Fire Authorities Council. Setembro de 2001.
- [2] JORIO, V. L. Gotthard road tunnel has become safer. Swissinfo.ch. Disponível em: <<http://www.swissinfo.ch/ger/gesellschaft/gotthard-strassentunnel-ist-sicherer-geworden/31380918>>. Acesso em: 18 jan. 2020.
- [3] SERAFINI, R.; RAMBO, D. A. S.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio. Concreto & Construções. Ed. 89. São Paulo, 2018.
- [4] SERAFINI, R. et al. Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. Construction and Building Materials, v. 214, p. 254-268, 2019.
- [5] FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno. Técnica. Revista de Tecnologia da Construção, São Paulo, v. 10, n. 66, p. 48-51, 2002.
- [6] COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica. Instituto Brasileiro do Concreto - 44º Congresso Brasileiro. Belo Horizonte, 2002.
- [7] ANDERBERG, Y. Spalling phenomena of HPC and OC. Gaithersburg, Maryland, 1997.
- [8] NINCE, A. A. Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil: s.n., 2006.
- [9] PURKISS, J. A. Fire Safety Engineering Design of Structures. Butterworth Heinemann. Oxford, 1996.
- [10] KHOURY, G.; MAJORANA, C. E. Modelling of concrete spalling in fire. Aimeta Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 15p., 2001.
- [11] KHOURY, A. G. Effects of fire in concrete and concrete structures. Progress in Structural Engineering and Materials, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.
- [12] SYLVERIO, M. V. M. Metodologia de homologação do concreto com fibras para túneis para o risco de incêndio. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil : s.n., Dezembro de 2018.
- [13] EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST BUILDING PRODUCTS FOR CONCRETE – EFNARC, Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings. Março de 2006. Disponível em: <www.efnarc.org>. Acesso em: 12 fev. 2020.

Incêndios em túneis construídos com concreto reforçado com fibras com função estrutural

RONNEY RODRIGUES AGRA – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO

RAMOEL SERAFINI – ENGENHEIRO CIVIL, DOUTORANDO

MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO

ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR-DOUTOR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DIMAS ALAN STRAUSS RAMBO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR-DOUTOR

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

ANTONIO FERNANDO BERTO – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRE

LABORATÓRIO DE SEGURANÇA AO FOGO E A EXPLOSÕES DO INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

RESUMO

O concreto reforçado com fibras é utilizado na fabricação de segmentos destinados ao revestimento de túneis. Porém, os requisitos normativos e pré-normativos nacionais e internacionais não apresentam uma abordagem abrangente de projeto para o CRF em situação de incêndio, o que revela a necessidade de investigações a respeito do assunto. O objetivo deste artigo é apresentar uma revisão de estudos sobre os efeitos das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas do CRF para túneis.

I. INTRODUÇÃO

O uso crescente do concreto reforçado com fibras (CRF) na construção civil e, em especial, em túneis, se deve a razões econômicas e técnicas. Isto se consolidou na área de túneis após a publicação do Boletim 83 da *fib* [1,2], que parametrizou sua utilização para o revestimento de túneis produzidos com anéis segmentados executados com tuneladoras TBM (*Tunnel Boring Machines*) [3]. Essa publicação possui uma

abordagem próxima àquela adotada no Brasil através das práticas recomendadas do IBRACON [4] e vêm sendo base dos textos ora em discussão na ABNT sobre o tema. Nessa abordagem, é fundamental a parametrização do comportamento do CRF através do estabelecimento de equações constitutivas que caracterizem a capacidade resistente do compósito até a fratura da matriz, em conjunto com as resistências residuais pós-fissuração.

Há diversos exemplos históricos de acidentes, em vista do reconhecimento tardio de que as estruturas de concreto devem ser verificadas para a condição de incêndio. Entretanto, requisitos normativos e pré-normativos nacionais e internacionais, bem como códigos-modelo, não apresentam abordagem adequada e abrangente de projeto para o CRF em situação de incêndio, o que pode conduzir a soluções ineficientes, colocando em risco a segurança estrutural nessas condições. A escassez de base normativa para o modelo de projeto em situação de incêndio do CRF e o fato de que as normas e pré-normas atuais – como é o caso da EN 1992-1-2

e *fib Model Code 2010* – estabelecem apenas como deve ser realizado o projeto estrutural do CRF em temperatura ambiente revelam a necessidade de investigações a respeito do comportamento do CRF em situação de incêndio.

Embora os estudos focados no efeito do fogo em túneis sejam escassos na literatura, destaca-se o trabalho realizado por Serafini et al. [5], que avaliou o efeito do fogo nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com macrofibras sintéticas¹ para aplicações tuneleiras. Os resultados mostram que um intenso gradiente de temperaturas é induzido no interior do compósito com a elevação da temperatura. Essa verificação, no entanto, só é possível por meio de ensaios de aquecimento em fornos, com a ação direta de chama, o que permite análises reais de simulação de incêndio para a avaliação pós-incêndio das estruturas de CRF. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão do estado da arte dos efeitos das elevadas temperaturas em concretos reforçados com fibras para túneis construídos com tuneladoras TBM.

¹ MACROFIBRA DE POLIPROPILENO (BARCHIP48) DE COMPRIMENTO 48 MM, FATOR DE FORMA 67 E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE 10 GPa.



2. APLICAÇÕES DO CRF EM TÚNEIS TBM

Devido à maior flexibilidade para a produção de elementos pré-fabricados, o CRF elimina ou diminui consideravelmente a necessidade de montagem da armadura convencional, proporcionando ganhos de produtividade e redução do espaço necessário para a fabricação de segmentos destinados ao revestimento de túneis TBM [3]. Esses segmentos são utilizados para compor os anéis que são instalados a cada avanço do equipamento, por meio de atuadores hidráulicos (*jacks*), que exercem forças de empuxo sobre as aduelas do anel anterior.

Esses anéis de revestimento têm sua adequação estrutural garantida pela armadura, que pode ser constituída por sistemas convencionais, pelo reforço exclusivo de fibras ou pelo reforço híbrido composto por fibras e barras de aço. As aduelas pré-moldadas para o revestimento de túneis precisam resistir a esforços nas fases transitórias (desmoldagem, empilhamento, transporte, forças de empuxo e forças de interação com o solo), sendo que a adição de fibras nessas peças acarreta melhoria da ductilidade dos elementos, garantindo a segurança durante a manipulação das peças [3]. Por meio do correto estudo de dosagem das fibras, pode-se evitar o processo de fissuração originado por efeito dinâmico de impactos nas fases anteriores à instalação da aduela em obra.

Dentre as metodologias analíticas de dimensionamento, a Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo [2] (em inglês *International Tunneling and Underground Space Association*) apresenta o método ana-

lítico de cálculo e o método viga-mola para determinar os esforços, mediante análises eficientes por meio de programas de elementos finitos. Os carregamentos devem ser analisados de forma cuidadosa para alcançar segurança na estabilidade de túneis, inclusive a capacidade resistente residual após a ocorrência de um potencial incêndio. Nesse sentido, é importante entender a influência da temperatura e da ação do incêndio no CRF, de modo a realizar uma verificação bem fundamentada.

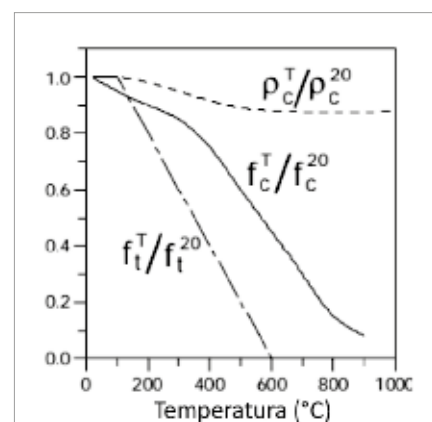
3. O EFEITO DA TEMPERATURA E DO INCÊNDIO NO CRF

Em geral, o comportamento da matriz de concreto do CRF sofre alterações com a temperatura de maneira similar às aquelas verificadas para o concreto simples. Entre as propriedades mecânicas do concreto, a resistência à tração apresenta o comportamento mais sensível à temperatura (Figura 1). De forma geral, após o resfriamento e em relação ao concreto aquecido, a resistência à tração é maior para concreto com sílica ativa; decresce rapidamente com a temperatura em concreto de alto desempenho (principalmente para $T \geq 600^{\circ}\text{C}$); é pouco afetada pelo tipo de resfriamento (lento e controlado no forno ou rápido na água); e é próxima da resistência a quente em concreto de alta resistência com sílica ativa [6]. No entanto, esta condição de variação comportamental está associada à garantia de que não haja lascamento explosivo, o que deve ser controlado por metodologia específica.

O comportamento pós-fissuração do CRF, quando submetido a elevadas temperaturas, varia conforme o tipo e o teor de fibra utilizado, a tem-

peratura de exposição e o tempo de exposição. A principal preocupação é quanto à sua resistência residual à tração, que pode ser severamente prejudicada em temperaturas acima de 300°C . O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) apresenta menores reduções na resposta pós-pico para temperaturas acima de 400°C , enquanto o concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP) apresenta maiores reduções de resistência à tração pós-fissuração e tenacidade em razão da degradação das fibras.

Por meio da utilização do ensaio preconizado pela EN 14651, Serafini et al. [5] avaliaram a resistência residual à tração na flexão do CRFP submetido ao fogo. Os prismas de CRFP (8 kg/m^3 de macrofibras poliméricas²) foram submetidos ao ensaio de fogo direto, em aquecimento unifacial a temperaturas de até 1100°C por 120 minutos, reproduzindo a curva H (hidrocarbonetos), o que tornou a simulação



Fonte: adaptado de [6]

► **Figura 1**
Redução da densidade e resistência à compressão e à tração do concreto em função da temperatura

² MACROFIBRA DE POLIPROPILENO (BARCHIP48) DE COMPRIMENTO 48 MM, FATOR DE FORMA 67 E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE 10 GPa.

mais próxima da realidade de incêndio em túneis. Os resultados demonstram que o CRFP não apresenta resistência à tração na flexão significativa após exposição ao fogo (Figura 2), o que está relacionado com a fusão (170°C) e ignição (400-500°C) das fibras poliméricas na região de tração do corpo de prova, especialmente nos primeiros 12 cm a partir da face afetada.

Os valores de resistência à tração da matriz cimentícia reduziram, em média, 96,6% em relação à temperatura ambiente, o que está associado com a decomposição dos produtos de hidratação da pasta de cimento, redução da área específica dos hidratos, aumento no volume total de poros e mudanças na distribuição de poros na pasta de cimento. Já as reduções apresentadas nos valores de resistência à tração pós-fissuração no estado limite de serviço (ELS) – em torno de 85,3% – e estado limite último (ELU) – em torno de 94,1% – estão relacionadas a mudanças mi-

croestruturais na pasta de cimento e, principalmente, na deterioração das fibras. Verificou-se ainda que a densidade e o módulo de elasticidade dinâmico foram reduzidos devido à influência de fissuras no corpo de prova, redução no volume de sólidos da pasta, mudanças físico-químicas na matriz e degradação das fibras [5].

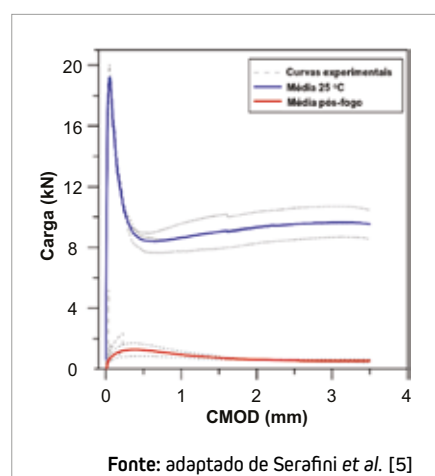
Em 600°C, as reduções em termos de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram, em média, de 64,9% e 96,6%, respectivamente, quando comparados aos valores obtidos na temperatura ambiente. O modelo experimental proposto por Serafini et al. [5] indica que as taxas de redução de resistência à compressão do CRFP são 0,32; 0,20; 0,11; 0,07 e 0,07 MPa/min para as distâncias de 3, 6, 9, 12 e 15 cm da face aquecida diretamente pelo fogo, respectivamente. Em relação ao módulo de elasticidade, as taxas de redução são 0,2; 0,15; 0,08; 0,05 e 0,05 GPa/min para as distâncias de 3, 6, 9, 12 e 15 cm, respectivamente. Esse modelo consiste em uma abordagem experimental alternativa para a avaliação pós-incêndio de estruturas de túneis construídas com CRFP.

As propriedades mecânicas do CRFP exposto a elevadas temperaturas também foram investigadas em estudo conduzido por Rambo et al. [7]. O ensaio de Duplo Puncionamento⁴ foi aplicado para avaliar a resistência à tração residual do compósito (8 kg/m³ de macrofibras poliméricas⁵) exposto a temperaturas de até 600°C em um forno elétrico industrial (*Inforgel Company*). Notou-se que a resistência à tração do CRFP reduz-se gradualmente com o aumento da temperatura e a resposta pós-fissuração varia significa-

tivamente com a temperatura (Figura 3). O efeito da temperatura na redução da resistência mecânica e no módulo de elasticidade do CRFP se apresentou de maneira similar ao que ocorre no concreto convencional.

O efeito da temperatura não foi significativo até 200°C, visto que as amostras de CRFP apresentaram valores de resistência residual similares aos da temperatura ambiente. Entretanto, a partir de 400°C, a resistência à tração pós-fissuração reduziu-se significativamente (em torno de 54%) quando comparada à temperatura ambiente. Os autores citam que o ensaio de Duplo Puncionamento não apresentou resposta conclusiva após exposição a altas temperaturas devido à degradação da superfície da amostra, somada à punção que resulta no esmagamento da matriz deteriorada. Apesar disso, o gradiente de temperatura no interior das amostras pode ter preservado parte do material (matriz ou fibras) e, conseqüentemente, parte da resistência pós-fissuração do compósito.

Após exposição à temperatura de 600°C, o valor de densidade de consumo de energia (kJ/m³) para uma deformação de 0,2% foi, em média, 89,9% menor que o valor obtido à temperatura de 25°C. Também em 600°C, as reduções em termos de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram estatisticamente semelhantes aos valores obtidos no estudo de Serafini et al. [5]. A perda significativa de resistência residual à compressão a partir de 300°C está relacionada com a incompatibilidade entre as deformações térmicas do agregado e da pasta, a decomposição dos produtos de hidratação do compósito e a degradação



▶ **Figura 2**
Curvas Carga-CMOD³ para o CRFP antes e após exposição ao fogo (curva de hidrocarbonetos)

³ CMOD – *CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT* – ABERTURA DA FISSURA NO ENTALHE CENTRAL DA PEÇA, MEDIDA NO ENSAIO NORMALIZADO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE CPs DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.

⁴ CPs DE 150 X 150 MM (DIÂMETRO X ALTURA). DISCOS DE CARGA DE DIÂMETRO 37,5 MM.

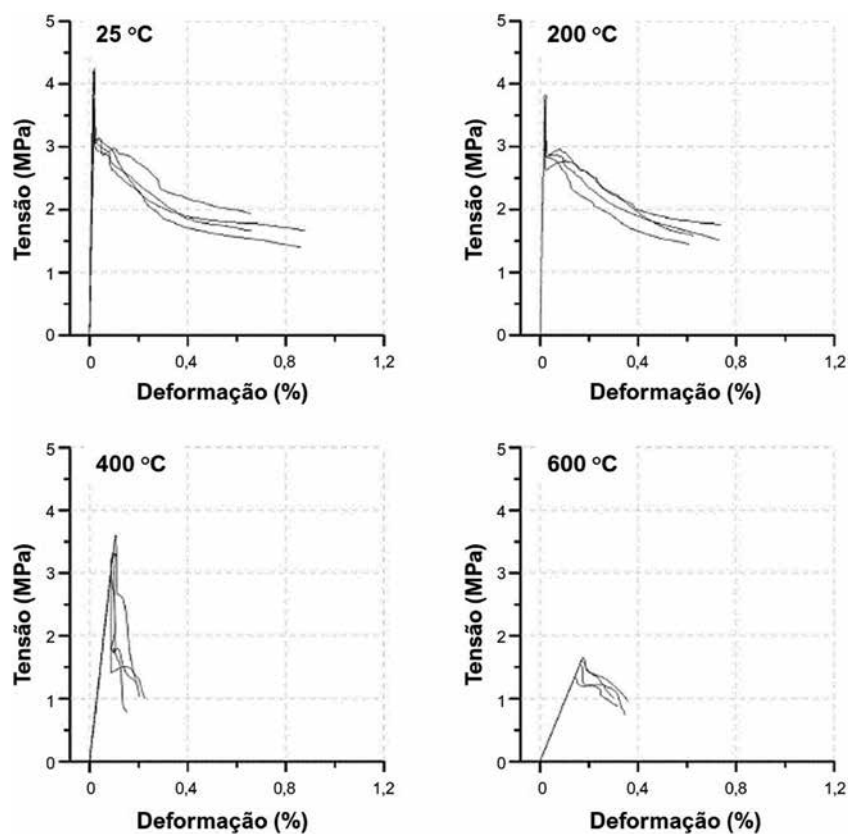
⁵ MACROFIBRA DE POLIPROPILENO (BARCHIP48) DE COMPRIMENTO 48 MM, FATOR DE FORMA 67 E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE 10 GPa.

das fibras sintéticas. A redução do módulo de elasticidade está relacionada com o aumento da porosidade do compósito, justificada pelo intenso processo de decomposição dos produtos de hidratação, principalmente entre a faixa de temperatura compreendida entre 150 e 450°C [7].

Agra et al. [8] evidenciaram que o ensaio DEWS⁶ é capaz de caracterizar o CRFA (35 kg/m³ de fibras de aço⁷) quanto à resistência à tração residual, mesmo em condições severas, como no caso de amostras submetidas à ação do fogo. A avaliação ocorreu sem haver prejuízos aos valores obtidos como resposta do material, visto que não foram constatados danos no concreto em condições de contato. Os autores citam que os valores de resistência à tração da matriz cimentícia após exposição ao fogo foram, em média, 71,1% menores que os obtidos em temperatura ambiente, o que está associado a desidratação de produtos da pasta de cimento, perda de capacidade de reforço das fibras e mudanças na distribuição dos poros.

Já, os valores de resistência à tração pós-fissuração no ELS (COD = 0,5 mm) e no ELU (COD = 2,5 mm) foram, em média, 64,1% e 59,8% menores que os obtidos em temperatura ambiente (Figura 4). Esses efeitos estão relacionados com mudanças físico-químicas na matriz, mudanças microestruturais do compósito e degradação das fibras utilizadas como reforço.

Em um estudo realizado por Serafini et al. [9], os resultados obtidos por meio do ensaio DEWS para o CRFA (35 kg/m³ de fibras de aço⁸) exposto a 600°C também mostram que a resistência à tração da matriz cimentícia e a resistência à tração residual no ELS e ELU são significativamente afetadas. Os valores de



Fonte: adaptado de Rambo et al. [7]

► Figura 3

Curvas tensão-deformação obtidas por meio do ensaio de Duplo Puncionamento de corpos de prova de CRFP submetidos a diferentes temperaturas

resistência à tração da matriz cimentícia, após exposição a 600°C, foram, em média, 82,5% menores que os obtidos em temperatura ambiente. Já, os valores de resistência à tração pós-fissuração no ELS (COD = 0,5 mm) e no ELU (COD = 2,5 mm) foram, em média, 74,3% e 72,2% menores que os obtidos em temperatura ambiente.

Os processos de oxidação e corrosão das fibras de aço começam a acontecer em 500 e 700°C, respectivamente. Assim, as fibras de aço expostas a elevadas temperaturas se tornam frágeis e facilmente danificadas, devido aos efeitos de redução da área transversal e aumento significativo no tamanho do grão do aço. Logo, por volta de 700°C, o compósito não apresenta mais ganho de ductilidade, visto que as fibras passam a não mais con-

tribuir para melhorar o comportamento pós-fissuração do CRF.

Esses resultados [5,7,8,9] constituem referências importantes para a avaliação ao fogo de aduelas pré-moldadas de CRF no revestimento de túneis. Considerando que a maior contribuição das fibras ocorre no estágio pós-fissuração do compósito, propriedades como resistência à tração residual são severamente afetadas em elevadas temperaturas, devido a degradação das fibras. Esse fator deve ser levado em conta na fase de projeto, a fim de garantir a segurança estrutural dos elementos de CRF, especialmente quando há considerável demanda por esforços de flexão.

Vale ainda ressaltar que, na maioria dos casos, a espessura dos elementos de CRF está acima dos 15 cm utilizados na maioria das análises [5,8,9] e as

⁶ DEWS = DOUBLE EDGE WEDGE SPLITTING, ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPO DE PROVA COM DUPLO CORTE EM CUNHA.

^{7,8} FIBRA DE AÇO DRAMIX 3D 80/60BG DE COMPRIMENTO 60 MM E FATOR DE FORMA 80.

solicitações em serviço são menores que as transitórias. Assim, mesmo se houver deterioração significativa do material na face exposta ao fogo, isso não significa necessariamente a perda das condições de estabilidade do revestimento do túnel, visto que há possibilidade das camadas interiores fornecerem condições de suporte suficientes [5]. Isto se deve ao fato do dimensionamento dos segmentos estar correlacionado a condições críticas transitórias, como o empuxo dos atuadores, o que faz com que as condições de serviço sejam atendidas com grande margem de segurança na grande maioria dos casos.

4. GRADIENTE DE TEMPERATURA NO CRF EXPOSTO AO FOGO

As propriedades mecânicas do CRF são afetadas em função da distância até a face aquecida diretamente pelo fogo, visto que é induzido no compósito um gradiente de temperatura em um cenário de incêndio, gerando assim diferentes camadas de desidratação da pasta de cimento e microfissuras. Dessa maneira, qualquer avaliação das propriedades mecânicas globais de elementos de CRF expostos ao fogo

resulta na resposta mecânica média das camadas afetadas. Sabe-se que a diferença de temperatura observada na seção de um material depende de alguns fatores como a gravidade do incêndio em termos de duração e temperaturas máximas, a rapidez do início do incêndio, a forma da seção e suas propriedades térmicas [6]. Entretanto, poucos são os estudos que enfatizam o gradiente de temperatura no CRF exposto ao fogo e seu impacto nas propriedades mecânicas.

No estudo realizado por Serafini et al. [5], verificou-se que, à medida que o tempo de exposição do CRFP ao fogo aumenta, a temperatura interna do concreto aumenta em taxas diferentes para cada distância avaliada. Além disso, a temperatura interna do concreto diminui rapidamente em maiores distâncias do fogo, como pode ser comprovado na Figura 5, que apresenta os valores de regressão linear (Figura 5a) e taxas de aquecimento interno em função da distância (Figura 5b), para os resultados experimentais obtidos neste estudo. Os resultados indicam que a taxa de aquecimento interno do CRFP é praticamente constante para uma determinada profundidade e é função apenas da distância do fogo, como apontado na Figura 5a.

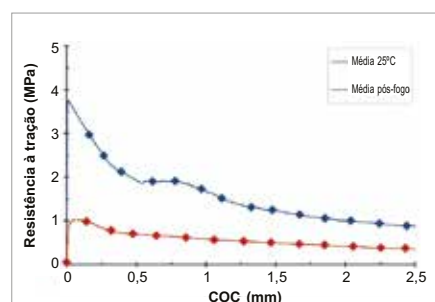
Notou-se ainda que os valores de gradiente de temperatura tendem a aumentar de forma quase linear com a duração do incêndio e reduzir em função da distância da face afetada diretamente pelo fogo. A baixa condutividade térmica do concreto é um dos principais fatores associados ao aumento do gradiente de temperatura em função do tempo. À medida que o gradiente de temperatura no concreto aumenta, as tensões de origem térmica provocam danos na forma de fissuras no compósito. Isto reforça a

necessidade de controle do lascamento explosivo a partir de uma proteção passiva, de modo a garantir a integridade do revestimento e uma capacidade resistente residual do conjunto que garanta a estabilidade da estrutura.

5. DINÂMICA DO INCÊNDIO EM TÚNEIS

Incêndios em túneis, como o caso do Eurotúnel em 1996 (Figura 6), enfatizaram a preocupação quanto à segurança de estruturas de concreto submetidas ao fogo, principalmente tratando-se do concreto de alta resistência. Na maioria dos casos de incêndios em túneis, foram atingidas temperaturas de até 1100°C. Nesta situação, a elevação da temperatura produz mudanças significativas na composição química da matriz cimentícia e na microestrutura do compósito, que são conhecidas por afetar significativamente o comportamento mecânico do CRF. Por isso, o projetista deve estar atento à verificação ante as ações de caráter excepcional, como ações devidas ao incêndio, reconhecidas pelo Eurocode 1 como uma situação acidental que compromete o estado limite de serviço (ELS) da estrutura e requer apenas verificações no estado limite último (ELU), associados com colapso estrutural ou outras formas semelhantes de falha estrutural, como falha por deformação excessiva.

O estudo do comportamento de segmentos pré-moldados (aduelas) no revestimento de túneis em uma situação de incêndio envolve algumas variáveis, inclusive relacionadas com a interação solo-estrutura, durante a exposição ao fogo, além da própria degradação dos elementos, cuja espessura é relativamente pequena (250 a 500 mm), o que pode comprometer a segurança estrutural.



Fonte: adaptado de Agra et al. [8]

► **Figura 4**
Curvas de resistência à tração média por abertura de fissura (COD) do CRFA na temperatura ambiente e após exposição ao fogo

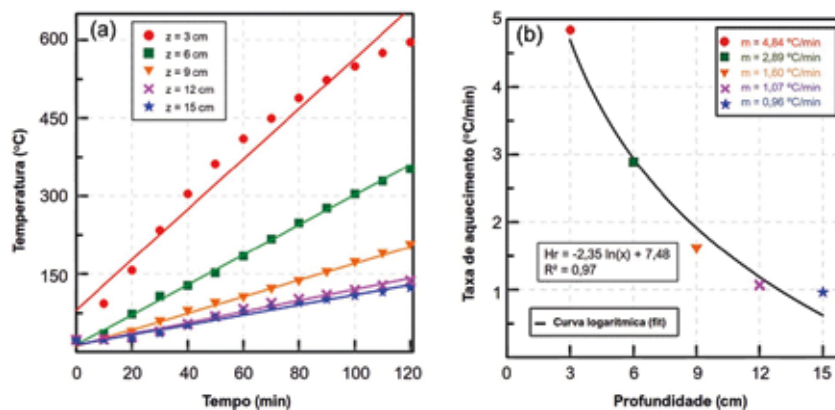


Apenas uma camada relativamente fina do revestimento do túnel de concreto é termicamente danificada, uma vez que a temperatura não aumenta além de 100°C a 140 mm de profundidade e além de 500°C a 50 mm de profundidade [5]. Geralmente, as primeiras fissuras aparecem após 31 minutos de exposição ao fogo e, após 60 minutos, todo o revestimento está fissurado. A formação e o desenvolvimento de fissuras são benéficos para a estrutura, pois, reduzindo a rigidez geral da estrutura, também reduz as reações causadas pela expansão térmica diferencial, atenuando seus efeitos [10].

O estudo realizado por Lilliu e Meda [10] descreve um possível procedimento para prever o comportamento de um túnel sob uma carga de incêndio, onde a interação com o solo, o efeito da expansão térmica e o dano material muitas vezes não são levados em consideração pelos códigos. Desta forma, tal procedimento pode ser usado para o projeto de incêndio de túneis. Apesar de toda fissuração, a estabilidade estrutural do túnel pode ser garantida por até 120 minutos de duração do fogo. Esse tipo de análise requer o uso de um código de elementos finitos não lineares adequado, que considere a interação solo-estrutura, comportamento de materiais não lineares e fissuras no concreto, dependência térmica das propriedades do material e acoplamento entre o problema térmico e mecânico. Dessa forma, parametrizações do comportamento como as descritas no item 3 são fundamentais.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

A grande necessidade da sociedade brasileira para a construção de túneis ocorre com uma carência de referências nacionais e internacionais



Fonte: adaptado de Serafini et al. [5]

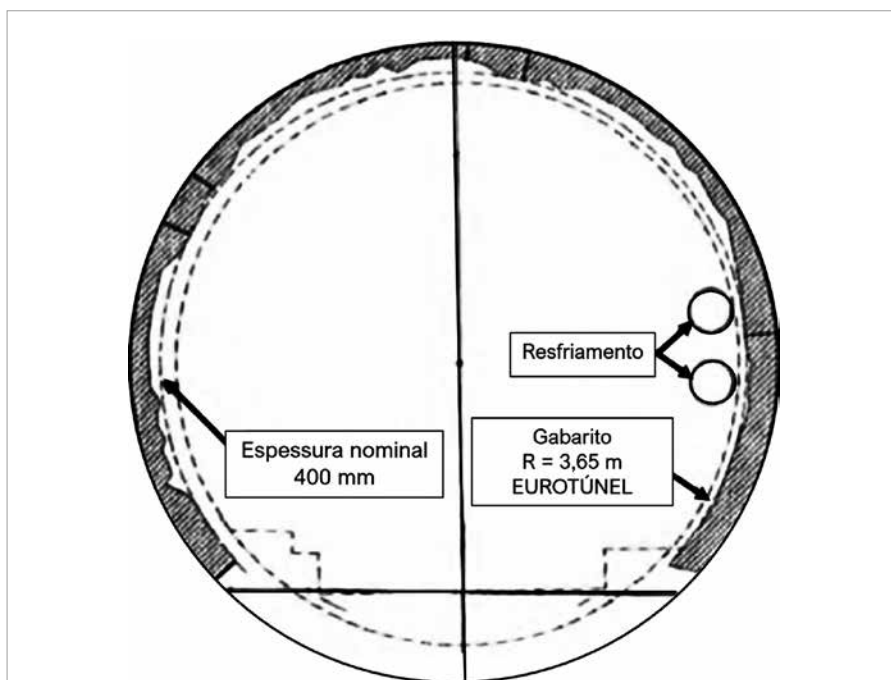
► Figura 5

Taxa de aquecimento interno do concreto:

(a) regressão linear; (b) valores de taxa de aquecimento

que permitam tratar o CRF sujeito a altas temperaturas de forma adequada para verificações de projeto, o que pode ocasionar resultados ineficientes, que coloquem em risco a segurança estrutural. Assim, a carência de base normativa sinaliza a necessidade de aprofundamento de estudos

no que concerne a requisitos, métodos de ensaio e procedimentos para projeto de estruturas de CRF quando submetidas à ação do fogo, especialmente no que se refere à caracterização do comportamento do material e a obtenção de equações constitutivas confiáveis para serem aplicadas nos




Fonte: adaptado de [6]

► Figura 6

Danos causados pelo fogo em uma seção típica do revestimento de concreto do túnel localizado no Canal da Mancha

modelos de previsão de comportamento. Em um cenário de incêndio em túneis um gradiente de temperatura é induzido no compósito, gerando as-

sim diferentes camadas afetadas com propriedades mecânicas distintas, de forma que o comportamento global da aduela consiste na resposta média

dessas camadas. Dessa forma, o conhecimento da influência da temperatura no comportamento do material é essencial a essas verificações. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete. State-of-the-art report. Bulletin 83. Switzerland, 2017.
- [2] INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACEY TECHNOLOGY – ITA. ITAtech Guidance for precast fibre reinforced concrete segments – Vol. 1: Design aspects. ITAtech Activity Group Support. ITAtech Report no. 7. April. 2016..
- [3] DE LA FUENTE, A.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D.; GALO BARDES, I. Projeto de segmentos para obras de túneis com tuneladora utilizando concreto com fibras. Concreto & Construções. Ed. 88. São Paulo, 2017.
- [4] Prática Recomendada IBRACON/ABECE - Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras. CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras. 2016.
- [5] SERAFINI, R.; DANTAS, S.R.A.; SALVADOR, R.P.; AGRA, R.R.; RAMBO, D.A.S.; BERTO, A.F.; FIGUEIREDO, A.D. Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. Construction and Building Materials, 2019, v. 214, 254-268.
- [6] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. fib Bulletin 46, Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment, State-of-art report. Lausanne, Switzerland, 2008.
- [7] RAMBO, D. A. S.; BLANCO, A.; DE FIGUEIREDO, A. D.; DOS SANTOS, E. R. F.; TOLEDO, R. D.; GOMES, O. D. F. M. Study of temperature effect on macro-synthetic fiber reinforced concretes by means of Barcelona tests: An approach focused on tunnels assessment. Construction and Building Materials, 2018, 158, 443-453.
- [8] AGRA, R. R.; SERAFINI, R.; FIGUEIREDO, A. D.; BERTO, A. F. Avaliação dos efeitos do fogo na resistência à tração residual do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio DEWS (Double Edge Wedge Splitting). In: 5th IBERIAN-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON FIRE SAFETY. Porto, Portugal, 2019.
- [9] SERAFINI, R.; AGRA, R.R.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A.D. The effect of elevated temperatures on the tensile properties of steel fiber reinforced concrete by means of double edge wedge splitting (DEWS) test: preliminary results. 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - FraMCoS-X. Bayonne, France, 2019.
- [10] LILLIU, G.; MEDA, A. Nonlinear Phased Analysis of Reinforced Concrete Tunnels Under Fire Exposure Article. Journal of Structural Fire Engineering, 2013, v. 4, n. 3.

▶ Excelência em EDUCAÇÃO CONTINUADA – Programa MasterPEC “Master em Produção de Estruturas de Concreto” | Calendário de Cursos 2020

Curso	Instrutores	Data	Local	Inscrição	Patrocinador	Créditos
Prevenindo, Mitigando e Convivendo com a Reação Alcali Agregado e Mecanismos Correlatos em Estruturas de Concreto	Leandro Sanchez	2 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	6
Ensaio Destrutivos e Não Destrutivos Para Avaliação de Estruturas de Concreto	Enio Pazini	2 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	8
Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado	Leandro Trautwein	2 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	6
Pavimentos de Concreto Permeáveis	José Tadeu Balbo	2 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	6
O Fenômeno Térmico no Concreto Massa	Eduardo Gambale	3 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	4
Concreto e Incêndio – Conceitos, Estudos de Casos e Retrofitis	Carlos Brites	3 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	4
Reforço de Vigas de Concreto Armado à Flexão e Cisalhamento Com Compósitos	Glauca Dalfré	3 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	6
Corrosão e Proteção Catódica de Armaduras de Aço em Estruturas de Concreto	Luiz Paulo Gomes	3 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	4
Análise da Estabilidade em Estruturas Pré-Moldadas de Concreto Segundo a NBR 9062:2017	Marcelo Ferreira	3 de setembro	Florianópolis	IBRACON	ABCIC	4
O Conceito de Desempenho Aplicado às Estruturas de Concreto	Alexandre Brites	4 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	4
Structural Health Monitoring – SHM	Túlio Nogueira Bittencourt	31 de agosto a 1 de setembro	Florianópolis	IBRACON	IBRACON	18

Desenvolvimento de concreto geopolimérico projetado para proteção contra incêndio

G. VOLLMANN | A.L. HAMMER | M. THEWES

RUHR UNIVERSITY BOCHUM, INSTITUTO DE GERENCIAMENTO DE TÚNEIS E CONSTRUÇÃO, BOCHUM, ALEMANHA

E. KLEEN | D. UHLMANN

MC BAUCHEMIE, BOTTRUP, ALEMANHA

T. WEINER | J. BUDNIK

PORR DEUTSCHLAND GMBH, DEPARTAMENTO DE TÚNEL, DÜSSELDORF, ALEMANHA

C. THIENERT | F. LEISMANN | C. KLAPROTH

STUVA, TÚNEL E CONSTRUÇÃO, COLÔNIA, ALEMANHA

ADRIANO DORNFELD SALDANHA – GERENTE COMERCIAL

SEGMENTO TÚNEIS MC – BAUCHEMIE

I. INTRODUÇÃO

I.1 Antecedentes

As estruturas de túneis existentes nas vias de transporte rodoviário, ferroviário e metroviário são expostas a fortes pressões durante o curso de sua vida útil, o que pode causar danos. Decisivas para as medidas estruturais correspondentes são – além do envelhecimento da estrutura do túnel - também as mudanças nas regulamentações e o aumento nos requisitos de segurança para os próprios túneis. Os incêndios no túnel do Mont Blanc (1999), Tauern Tunnel (1999), Gotthard Tunnel (2001) e

Eurotunnel (2008) mostraram que, além das melhorias operacionais, também são necessárias melhorias na área de proteção estrutural contra incêndios. Normas e diretrizes válidas atualmente também estão considerando essas melhorias. (Goj et al. 2018). Uma visão das ações atuais e do trabalho de manutenção planejados (Tabela 1) mostra que o planejamento nesta área foi realizado apenas para uma pequena parte do volume de construções atual e, portanto, haverá uma ocorrência muito maior de reparos e manutenção.

I.2 Problemas e objetivos

O envelhecimento progressivo

das construções e as interrelações acima mencionadas conduzem a uma necessidade considerável de manutenção a médio prazo, especialmente para túneis de tráfego de veículos e estruturas de acompanhamento da infraestrutura subterrânea. Um aumento no volume de tráfego, também em conexão com sistemas de propulsão alternativos, que cada vez mais penetrarão no mercado no futuro, pode levar a um aumento considerável das cargas de incêndio em potencial nos túneis e a um aumento significativo no risco de acidentes graves.

Essas interrelações resultam em uma situação de ameaça válida para a infraestrutura subterrânea. As diretrizes e regulamentações atuais já consideram amplamente os últimos cenários de impacto - as especificações de projeto modificadas para proteção estrutural contra incêndio já cobrem um grande número de situações e impactos concebíveis. No entanto, a grande maioria dos túneis existentes foi construída sob especificações que hoje podem ser consideradas desatualizadas. Isso

► Tabela 1 – Comparação entre o estoque atual e a manutenção futura planejada (cf. Hæck 2018, cf. ASFINAG et al. 2018, cf. Hamburger Hochbahn)

	Túnel ferroviário	Túnel rodoviário	Túnel metroviário
Estoque atual	535	305	604
Manutenção futura planejada	12.803	12.953	Exemplo dos túneis ferroviários elevados de Hamburgo: túneis construídos entre 1912 e 1913

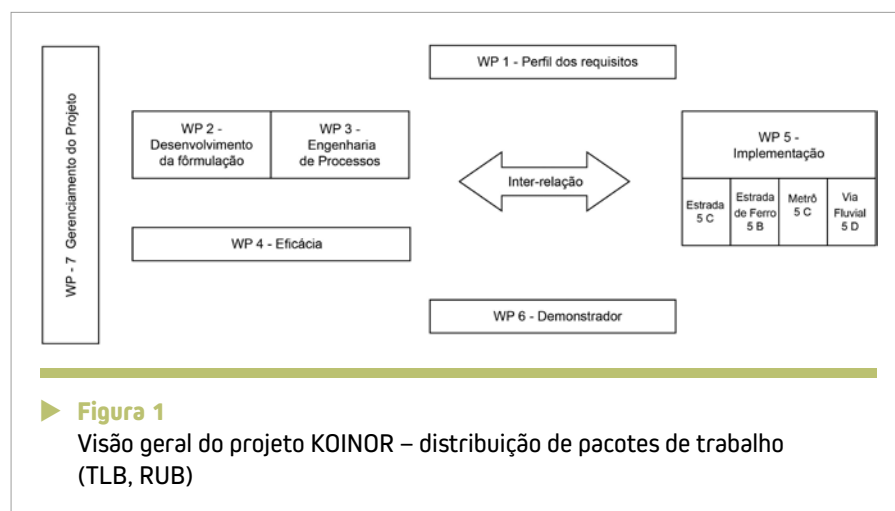
significa que, no caso de um incidente, são possíveis problemas significativos quanto à resistência dos materiais da seção estrutural e, portanto, com grande potencial de dano no caso de eventos de incêndio. Portanto, melhorias no reparo estrutural das construções, aumentando os níveis de segurança atuais, se fazem urgentes.

Neste contexto, o projeto KOINOR visa desenvolver novos métodos para o reparo de túneis e garantir sua eficácia por meio de investigações adequadas. Um objetivo adicional é compilar conceitos de reparo amigáveis à disponibilidade para que, no caso de uma medida estrutural, seja necessário minimizar um impacto negativo na rede de tráfego ao redor do túnel.

2. PROJETO KOINOR

2.1 Descrição do projeto

O KOINOR (nome do projeto que a STUVA – empresa de pesquisa sem fins lucrativos, que congrega todas as autoridades importantes para o segmento de construção e operação de túneis e outros sistemas de tráfego – iniciou em agosto de 2018, visando pesquisar novas tecnologias e sistemas de proteção contra incêndio, melhorias e recuperação de estruturas de túneis). É um projeto de três anos, financiado pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha (BMBF), no âmbito do programa “Pesquisa para Segurança Civil”. O KOINOR é um projeto de pesquisa conjunto dos seguintes parceiros: Instituto de Gerenciamento de Túneis e Construção do Ruhr-University Bochum (TLB),



► **Figura 1**
Visão geral do projeto KOINOR – distribuição de pacotes de trabalho (TLB, RUB)

Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen (STUVA), MC-Bau-chemie e PORR Alemanha. Em estreita coordenação com os parceiros associados Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Hamburger Hochbahn AG, Eisenbahnbundesamt (EBA), DB Engineering and Consulting e DB Netz AG, são realizadas pesquisas para encontrar uma solução universal, flexível e compatível com os padrões, nesse tema.

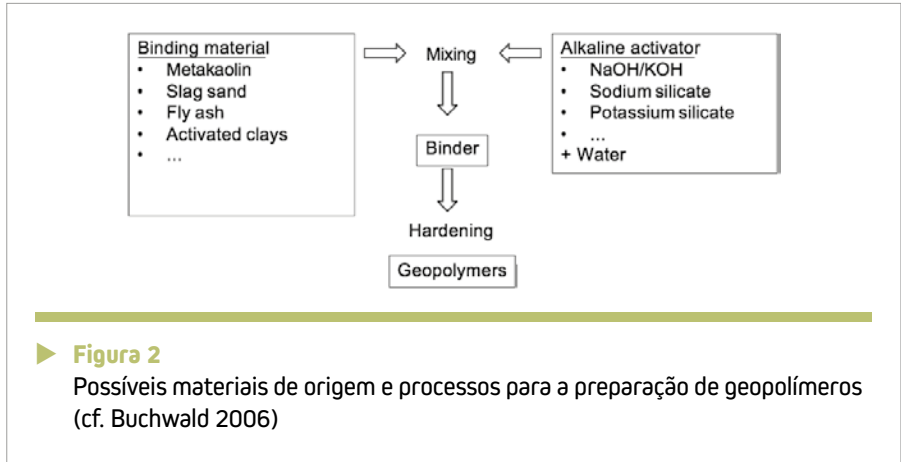
2.2 Objetivo

O objetivo do projeto é o desenvolvimento de conceitos abrangentes para o reparo específico dos túneis de transporte ou melhoria estrutural da infraestrutura subterrânea no contexto de possíveis cenários de incêndio. O foco central é a criação de um novo sistema de manutenção projetado para revestimentos de túneis com base em concreto geopolimérico, com a ajuda do qual a sinergia descrita entre manutenção e reparo de proteção contra incêndio possa ser realizada. Ao mesmo tempo, os potenciais de otimização econômica, operacional, de processos e de materiais de construção devem ser levados ao li-

mite. As metas principais são, por um lado, o desenvolvimento de conceitos de manutenção adaptados ao modal de transporte, que levam em conta não apenas as condições do entorno operacional do respectivo modal de transporte (rodoviário x ferroviário de transporte (rodoviário x ferroviário x metroviário), mas também os diferentes métodos construtivos (túnel de alvenaria x valas a céu aberto x túneis escavados no método NATM – *New Austrian Tunneling Method*). Por outro lado, o concreto geopolimérico projetado desenvolvido deve garantir uma alta resistência ao fogo, com baixa penetração térmica e alta durabilidade, com baixa espessura de camada e, assim, suportar os meios agressivos das estruturas de construção mencionadas (por exemplo, induzidas por gases de escape, sais descongelantes – cloretos - ou tensões dinâmicas). Para poder responder às questões de disponibilidade e aversão ao risco por parte dos operadores e usuários, elas estão sendo identificadas e implementadas nos conceitos.

2.3 Processo

O projeto de pesquisa subdivide-se em sete pacotes de trabalho, como



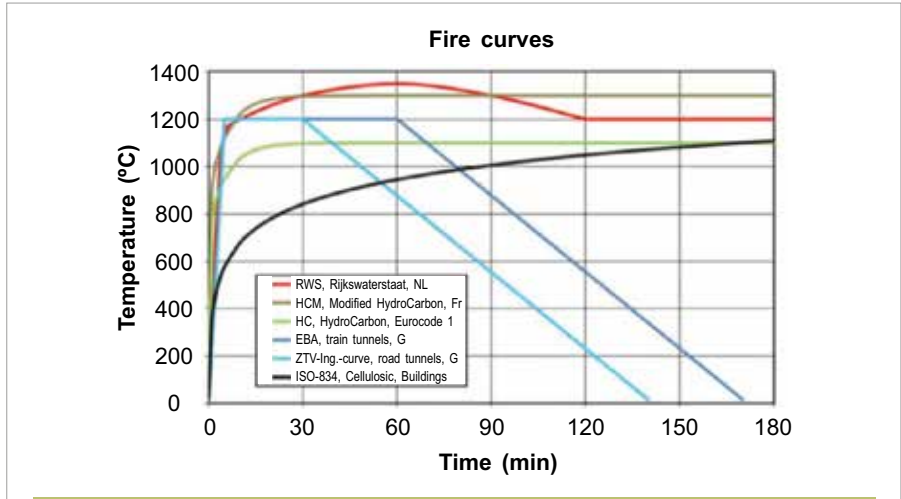
► **Figura 2**
Possíveis materiais de origem e processos para a preparação de geopolímeros (cf. Buchwald 2006)

mostra a Figura 1. Com base em pesquisas sobre diretrizes, especificações, e outros pontos, é necessário desenvolver perfis de requisitos que definam o nível mínimo de inovação a ser alcançado para o sistema de reparo a ser desenvolvido (resistência ao fogo, resistência ao sal de degelo e geadas, durabilidade, fadiga mecânica etc).

Esse processo deriva especificações para o desenvolvimento futuro dos sistemas de manutenção em termos de materiais e processos construtivos. Esses serão então desenvolvidos em modo teórico e prático como formulações adequadas de

materiais construtivos baseados em geopolímeros e implementados em diversos ensaios.

Simultaneamente, uma tecnologia de processo adequada para aplicar as soluções desses materiais está em desenvolvimento. Questões do processo de execução, como a possibilidade de produção em etapa única, em oposição ao processo habitual, devem ser respondidas. Além disso, corpos de prova de grandes dimensões são investigados em relação à sua eficácia em termos de resistência ao fogo, resistência ao impacto, comportamento do material, etc. e



► **Figura 3**
Diferentes curvas de incêndio utilizadas internacional e nacionalmente (TLB, RUB)

parâmetros para cálculos numéricos adicionais são determinados.

Paralelamente, estratégias específicas para cada modal de transporte de (rodovias, ferrovias, metrô) devem ser desenvolvidas. Além da aplicabilidade geral do procedimento desenvolvido, o foco aqui está na aplicabilidade durante o tráfego contínuo, em que é dada atenção especial aos riscos associados e problemas de disponibilidade. Os estudos de viabilidade econômica complementarão este trabalho para quantificar as vantagens econômicas do novo sistema em comparação às estratégias de manutenção convencionais. A estrutura do projeto será finalizada por um protótipo, no âmbito do qual a implementação dos conceitos será apresentada em uma aplicação em escala 1: 1, respeitando os tipos de modais de transporte participantes.

3. PRIMEIROS PASSOS NO DESENVOLVIMENTO DO TRAÇO

3.1 Fundamentos dos geopolímeros

Geopolímeros são aglutinantes inorgânicos, pelo que o prefixo “Geo” pretende refletir a estreita relação com materiais geológicos (Davidovits, 1999). Os aglutinantes de geopolímeros são sistemas inorgânicos de dois componentes, que consistem em um componente sólido reativo e uma solução de ativação alcalina. A Figura 2 ilustra a definição de um geopolímero no processo de fabricação. O contato dos dois componentes - ligante (sólido) e ativador - leva ao endurecimento da mistura. Em uma primeira



► **Figura 4**
Representação exemplar do bloco de metal brilhante na base (MC Bauchemie)

etapa de reação, o ativador alcalino libera o sólido e, em uma segunda etapa de reação, um polímero de aluminossilicato condensa-se a partir da solução. O resultado é uma estrutura de rede resistente à água, que é o aluminossilicato, variando entre amorfo a semi-cristalino. (Buchwald 2006).

Dependendo das matérias-primas e dos traços selecionados, os geopolímeros podem ter propriedades positivas. Para uso como sistema de reparo, incluem, acima de tudo, resistência química e à temperatura, alta impermeabilidade e baixa permeabilidade, além de tempo de cura rápido com altas resistências finais. (Buchwald 2006, Uebachs 2018).

3.2 Primeiros testes táteis para ação térmica

Internacionalmente, é necessário considerar diferentes cenários para determinar a resistência ao fogo de uma estrutura subterrânea. Esses cenários são geralmente representados por curvas de temperatura vs tempo. Na Alemanha, existem regulamentações para túneis rodoviários e ferroviários nas

normas relevantes: ZTV-Ing. T5 para túneis rodoviários e RIL 853 e EBA-RIL para túneis ferroviários. Não há especificações padronizadas para sistemas de metrô. Consequentemente, as curvas são adaptadas de outros modais de transporte ou adotadas de outras regiões do mundo. Por exemplo, os operadores franceses usam a chamada curva ISO 834, enquanto todo o Metrô de Doha foi planejado e construído com base nas especificações do RIL 853 (com base nas especificações da EBA). A Figura 3 fornece uma visão geral dessas curvas de incêndio.

É significativo que, em quase todos os casos de incêndio, o efeito *spalling* seja observado quando o concreto convencional, isto é, concreto sem a adição de fibras de polipropileno, é ensaiado seguindo todas as curvas. O *spalling* se torna um problema, pois, por conta dele, ou a armadura é exposta diretamente ao efeito térmico, ou a espessura restante da camada de revestimento é insuficiente, levando ao rápido aquecimento da armadura e redução de sua resistência a tração. Como resultado, pode ocorrer uma falha estrutural parcial do revestimento do túnel, combinada com a perda de capacidade de manutenção, até o colapso total da estrutura.

O desenvolvimento de uma solução de reparo feita em concreto geopolimérico oferece teoricamente várias vantagens nesse contexto. Para investigar o comportamento em situação de incêndio, um bloco de metal quente a 1300 °C foi armazenado em dois substratos diferentes como parte de um teste



► **Figura 5**
Área de suporte da placa incandescente no teste preliminar ao usar uma argamassa polimérica para reparos estruturais (MC Bauchemie)

preliminar (Figura 4). Esses substratos consistem de um concreto com uma camada suplementar aplicada, uma argamassa polimérica para reparos estruturais, resistente ao fogo – classe F-120 (Nafufill KM 250), de acordo com a ZTV-Ing., ou um geopolímero. Para esse fim, a camada acima mencionada foi aplicada à placa de substrato em um procedimento manual, uma vez que não havia solução pulverizável no momento do teste preliminar.

Após um tempo de exposição de cerca de dez minutos, o bloco metálico foi removido e o substrato



► **Figura 6**
Área de suporte da placa incandescente no teste preliminar usando um concreto geopolimérico (MC Bauchemie)

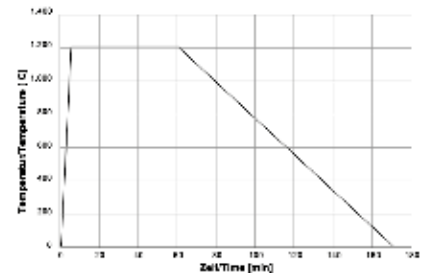
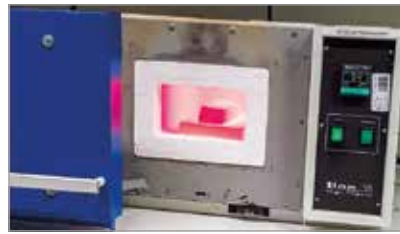


exposto termicamente foi examinado. O dano observado está documentado nas Figuras 5 e 6.

As Figuras 5 e 6 mostram claramente o efeito positivo do concreto geopolimérico. O *spalling* causou a destruição evidente da superfície de contato do concreto convencional com a argamassa polimérica aplicada (Figura 6) em comparação com a solução à base de geopolímero (Figura 7). A última solução mostra apenas uma ligeira formação de fissuras na superfície, cuja análise deve levar em consideração que elas não resultam de fissuras na camada de geopolímero aplicada, mas de fissuras no interior do substrato que se propagaram à superfície.

► Tabela 2 – Traços de concreto para os primeiros ensaios de comportamento sob ação de incêndio

Traço	Modificação do traço relacionado ao traço básico
1	(Base)
2	Proporção reduzida de escória, aumento da proporção significativamente maior de cinzas volantes
3	Proporção significativamente reduzida de escória, proporção significativamente maior de cinzas volantes
4	Ativador
5	Sem microsilica
6	Fluxo úmido, troca de cinzas volantes
7	Fluxo úmido, com redutor de retração
8	Proporção reduzida de areia fina de escória
9	Proporção reduzida de pó de escória, sem ativador
10	Troca de cinzas volantes por bauxita



► Figura 7

Forno Mufla de alta temperatura da marca Linn (cadeira de engenharia de materiais, Ruhr University Bochum) e curva temperatura-tempo de acordo com a diretriz da EBA “Requisitos de controle de incêndio e desastre para a construção e operação de túneis ferroviários”

4. CONCEITO EXPERIMENTAL

4.1 Tecnologia de materiais de construção

Como demonstrado, os ensaios preliminares mostraram que um concreto geopolimérico tem boas propriedades em relação à sua tendência de reduzir o efeito *spalling*. No entanto, a necessidade de aplicação por aspersão (projetado) e do atendimento a determinados requisitos mecânicos leva ao desenvolvimento de um traço menos convencional do concreto geopolímero. Ensaios iniciais com base em diferentes materiais em sua composição (Tabela 2), em relação a parâmetros específicos, como resistência à compressão e à flexão, foram realizados, com escopo crescente de investigação (de corpos de prova de pequenas à grandes dimensões), para o desenvolvimento de traços adequados em etapas sucessivas.

Além da determinação de propriedades básicas dos materiais, como resistência à compressão, o ponto de partida foi inicialmente investigar o comportamento sob a influência da temperatura em corpos de prova de pequenas dimensões. A influência das diferentes variações de traço foi determinada na Universidade RUB, em ensaios normatizados de exposição ao fogo em um forno mufla (Figura 7).

Sob a influência da temperatura, as amostras tornaram-se sinterizadas, sendo a eutética (mistura eutética é uma mistura de elementos químicos, em uma determinada proporção, na qual o ponto de fusão é o mais baixo possível, ou seja, durante o resfriamento uma fase líquida se transforma em pelo menos, duas fases sólidas) parcialmente alcançada - as amostras começaram a fluir. A composição e traço com o melhor comportamento do material serão usadas para ensaios adicionais (Figura 8).

4.2 Engenharia de processo

Testes de aspersão/ projeção controlados manualmente foram realizados



► Figura 8

Amostras das composições 3 e 8 após exposição à temperatura (TLB, RUB)

no Departamento de Concreto Projetado do Institute for Tunneling and Construction Management, já com o ajuste do equipamento para projeção de concreto geopolimérico (Figura 9).

Os primeiros resultados foram uma boa bombeabilidade do traço no processo de projeção via seca. O resultado foi um padrão de projeção homogêneo, que também mostrou um bom comportamento de aderência quando aplicado em camadas de maior espessura. Outros aspectos positivos foram a baixa geração de pó, com maior segurança ocupacional, e baixo esforço de limpeza do sistema de transporte, melhorando a engenharia de processo.

5. PRÓXIMAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Para a próxima fase do projeto, o desenvolvimento adicional dos traços, por um lado, e a otimização da engenharia de processo para a produção do sistema de reparo por projeção, por outro, serão destaque na pesquisa. A condutividade térmica do concreto geopolimérico aplicado por projeção mecânica será ensaiada através da produção de corpos de prova com termopares integrados, que serão testados sob a curva de temperatura em situação de incêndio

normatizada. Com base nos resultados obtidos, serão efetuados os ajustes necessários no traço para reduzir a condutividade térmica. Além disso, a influência dos materiais pós-tratamento será investigada em outras séries de ensaios.

Os ensaios do concreto projetado no processo de projeção por via seca foram realizados resultando em baixa geração de poeira e baixa reflexão. Uma etapa adicional é a adaptação dos testes ao processo de projeção por via úmida. Com o intuito de investigar a trabalhabilidade e bombeabilidade do concreto geopolimérico usando o processo de projeção via úmida, testes com diferentes tipos de bombas projetoras serão realizados. Além disso, estão planejados ensaios sobre o comportamento de aderência do sistema de reparo com o material projetado, no revestimento do túnel a ser reparado.

6. RESUMO E PERSPECTIVAS

O projeto de pesquisa KOINOR visa desenvolver conceitos abrangentes para a manutenção de infraestrutura subterrânea de transporte no contexto de possíveis cenários de incêndio. O novo sistema de manutenção por projeção a ser desenvolvido é baseado em um concreto geopolimérico. Os primeiros traços foram desen-



► **Figura 9**
Aplicação de concreto projetado no banco de ensaios de concreto projetado do Ruhr-University Bochum (TLB, RUB)

volvidos e investigados sob exposição à curva normatizada temperatura x tempo de um incêndio-padrão. Os primeiros resultados dos ensaios mostram um comportamento positivo do material sob ação da temperatura, que será ensaiado mais detalhadamente. A tecnologia de processo utilizada também produziu um padrão de projeção homogêneo com baixa geração de pó e redução da reflexão.

7. AGRADECIMENTOS

O Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha (BMBF) forneceu apoio financeiro no âmbito do projeto de pesquisa KOINOR. Esse suporte é gratamente reconhecido. 🏠

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Buchwald, A.: Was sind Geopolymere? Stand von Forschung und Technik sowie Chancen und Bedeutung für die Fertigteilindustrie. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 2, 2006, pp. 42-49
- [2] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, 2018.
- [3] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 853, Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten (RIL 853), 2002, letzte Aktualisierung 01.11.2014.
- [4] Eisenbahn Bundesamt (EBA) (Hrsg.): Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln, 2008.
- [5] Goj, K.; Fischer, O.; Ettelt, B.: Instandsetzung und Nachrüstung, Tunnel Pfaffenstein – Nachrechnung eines Straßentunnels im Bestand. In: DGGT (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau. Verlag Ernst & Sohn, 2018, pp. 147-179.
- [6] Haack, A.: 1 Einführung und Zielsetzung. In: ASFINAG, DB Netz AG, STUVA (Hrsg.): Sachstandsbericht 2017 "Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel4". Forschung + Praxis 50. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2018, pp. 1-3.
- [7] Janson, R.: Fire Spalling of Concrete, Doctoral thesis in Concrete structures, Stockholm, Sweden 2013.
- [8] Jüngst, C.; Gabl, Th.; Pucher, M.; Reichl, Ch.; Schnabl, R.; West, T.: 2 Ausgangslage. In: ASFINAG, DB Netz AG, STUVA (Hrsg.): Sachstandsbericht 2017 "Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel". Forschung + Praxis 50. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2018, pp. 4-25.
- [9] Uebachs, S., Geopolymerbeton und seine Eigenschaften. In: BetonWerkInternational 2, 2018, pp. 42-46.



Influência da projeção no processo de hidratação de misturas cimentícias contendo aceleradores

RENAN P. SALVADOR – QUÍMICO, PROFESSOR DOUTOR

ALINE C. RIBEIRO – ENGENHEIRA CIVIL, MESTRANDA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

ANTONIO D. DE FIGUEIREDO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR DOUTOR

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL, ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

SERGIO H. P. CAVALARO – ENGENHEIRO CIVIL, PROFESSOR DOUTOR

ESCOLA DE ARQUITETURA E ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL, UNIVERSIDADE DE LOUGHBOROUGH

RESUMO

concreto projetado usa aceleradores de pega para promover seu rápido endurecimento. A grande maioria dos estudos sobre a reatividade

dos aceleradores com o cimento focam em pastas misturadas mecanicamente. Este trabalho buscou avaliar a influência da projeção do concreto na cinética de reações do concreto projetado. Sua principal conclusão é que o processo de projeção acelera a hidratação do aluminato de cálcio, mas retarda a velocidade de hidratação do cimento. Complementarmente, verificou-se que o processo de mistura influencia a microestrutura da matriz cimentícia.

aplicações em túneis, esses produtos químicos são necessários para fornecer alta resistência mecânica inicial, fazendo com que a camada de concreto seja capaz de fornecer suporte ao maciço. Dependendo de sua composição química, diferentes mecanismos de hidratação e resistências mecânicas são observados em matrizes aceleradas (GALOBARDES et al., 2015; SALVADOR et al., 2016a).

Para avaliar a reatividade dos aceleradores com o cimento, a grande maioria dos estudos trata de pastas de cimento com aceleradores misturadas mecanicamente (JUILLAND et al., 2012; SALVADOR et al., 2016a, 2016b; XU; STARK, 2005). Embora este processo de mistura possa proporcionar energia suficiente para homogeneizar a pasta, existem diferenças significativas em relação ao processo de projeção utilizado na prática. Portanto, é crucial avaliar como o processo

► Tabela 1 – Composição química do cimento determinada por espectrometria FRX

Óxido	Teor (% em massa)
LOI	2,88
CaO	62,62
SiO ₂	19,89
Al ₂ O ₃	4,74
Fe ₂ O ₃	3,26
SO ₃	3,53
MgO	1,95
K ₂ O	0,99
Na ₂ O	0,13
Componentes minoritários	0,11
Soma total	100,0

I. INTRODUÇÃO

O concreto projetado difere do concreto convencional devido ao método de aplicação e ao uso de aceleradores de pega para promover o endurecimento rápido da matriz logo após a mistura (GALOBARDES et al., 2015). Os aceleradores são normalmente adicionados ao concreto no bico de projeção, imediatamente antes de ser projetado. Para

► Tabela 2 – Composição mineralógica do cimento determinada por DRX com refinamento de Rietveld

Fase	Teor (% em massa)
C ₃ S	58,3
C ₂ S	11,2
C ₃ Ac	4,1
C ₃ Ao	0,6
C ₄ AF	13,4
CaO	1,1
Ca(OH) ₂	1,7
CaCO ₃	1,9
CaSO ₄ .2H ₂ O	2,1
CaSO ₄ .0,5H ₂ O	4,4
K ₂ Ca(SO ₄) ₂ .H ₂ O	1,1
Soma total	100,0

de mistura influencia a cinética de reações de misturas cimentícias produzidas com aceleradores.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Foi utilizado um cimento Portland CEM I 52.5R (similar a um cimento CP V ARI). Sua composição química

ca determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) está apresentada na tabela 1. Sua composição mineralógica determinada por difração de raios-X (DRX) com refinamento de Rietveld está na tabela 2. Suas propriedades físicas estão apresentadas na tabela 3 (SALVADOR et al., 2016a).

Água destilada e um superplastificante composto por uma solução de policarboxilato (34% teor de sólidos) foram utilizados para preparar pastas. Um acelerador composto por sulfato de alumínio (livre de álcalis – LA) e outro composto por aluminato de sódio (alcalino – AC) foram empregados. Suas propriedades químicas e físicas encontram-se na tabela 4 (SALVADOR et al., 2016a).

2.2 Composição e preparação de pastas de cimento

As pastas misturadas mecanicamente eram compostas por cimento, água na relação água/cimento (a/c) 0,45 e superplastificante na dosagem igual a 1,0% sobre a massa de cimento (% smc). O acelerador LA foi adicionado a 7,0% smc e o AC a 3,0 % smc. As pastas misturadas mecanicamente foram identificadas como M_‘tipo de acelerador’. Pas-

► Tabela 3 – Propriedades físicas e químicas do cimento

Propriedade	Resultado
Calor de hidratação total (J/g)	433,0
Relação molar C ₃ A/SO ₃	0,39
Resíduo insolúvel (% em massa)	2,74
Superfície específica BET (m ² /g)	2,96
d ₅₀ (µm)	11,4

tas que não contêm acelerador são identificadas como ‘REF’. O processo de mistura para a pasta está descrito em (SALVADOR et al., 2016a).

As pastas projetadas eram compostas por cimento, água na relação a/c 0,32 e as mesmas dosagens de superplastificantes e aceleradores. As pastas projetadas foram identificadas como P_‘tipo de acelerador’. O processo de projeção foi realizado em um equipamento de projeção em escala reduzida apresentado na figura 1 (SALVADOR et al., 2017). Foi utilizada uma bomba helicoidal do tipo UP-Pictor. Esse tipo de bomba é adequado para fluidos como pastas de cimento, pois garante um fluxo de material constante, eliminando o efeito de pulsação. É operado com a pressão de 6 bar, usando um compressor de ar de 3 HP.



► Figura 1 Componentes do equipamento de projeção

► Tabela 4 – Propriedades químicas e físicas dos aceleradores

Propriedade	LA	AC
Teor de sólidos (% em massa)	47,6	43,0
Teor de Al ₂ O ₃ (% em massa)	13,5	24,0
Teor de SO ₄ ²⁻ (% em massa)	21,0	–
Teor de Na ₂ O (% em massa)	–	19,0
pH a 20 °C	3,0	12,0*

* Solução a 1,0 % em massa





► **Figura 2**
Pistola de projeção (a), bocal para pastas de cimento (b), vista da base do bocal (c)

A mangueira para o transporte da pasta tem um diâmetro interno de 40 mm e um comprimento de 4 m.

Uma pistola de projeção é conectada ao final da mangueira e seus detalhes estão apresentados na Figura 2. A pistola contém três entradas diferentes para a entrada de pasta de cimento, acelerador e ar comprimido (Figura 2.a). Um bico desenvolvido especificamente para este estudo é conectado na saída da pistola (Figura 2.b). Tem uma forma de tronco de cone, cujo diâmetro da base, diâmetro superior e altura medem 14,0, 6,0 e 10,0 mm,

respectivamente. Na parte superior, foi instalado um cilindro com extensão com 30,0 mm de comprimento e 6,0 mm de diâmetro interno, a fim de obter uma melhor homogeneização da mistura projetada. Na sua base, são encontrados seis furos de 2 mm de diâmetro para a entrada do acelerador e do ar comprimido (Figura 2.c).

Os aceleradores foram dosados por uma bomba diafragma pneumática tipo P.025. Esse tipo de bomba apresentou sucção homogênea para todos os aceleradores. A vazão dos aceleradores dependia de seu tipo e

dosagem e foi calculada com base no fluxo ideal de pasta de cimento (4,9 litros por minuto).

2.3 Ensaios realizados

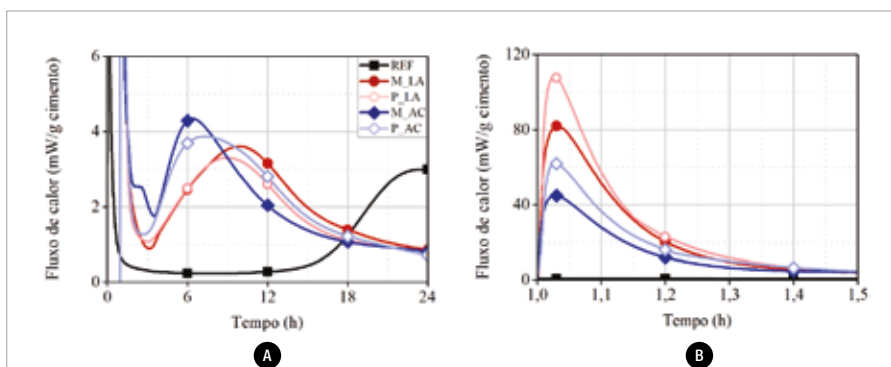
As pastas misturadas mecanicamente e projetadas foram caracterizadas por calorimetria isotérmica, difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise química por EDS. A calorimetria isotérmica foi realizada a 20 °C por 24 h utilizando 15,0 g de pastas de cimento em um calorímetro isotérmico I-cal 4000 (SALVADOR et al., 2016a). DRX foi realizado seguindo os procedimentos de (SALVADOR et al., 2019) nas idades de 15 min, 1 h, 3 h, 12 h e 24 h após a adição do acelerador. MEV e microanálise química por EDS foram realizados de acordo com (SALVADOR et al., 2020) nas idades de 15 min, 3h e 12 h após a adição do acelerador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

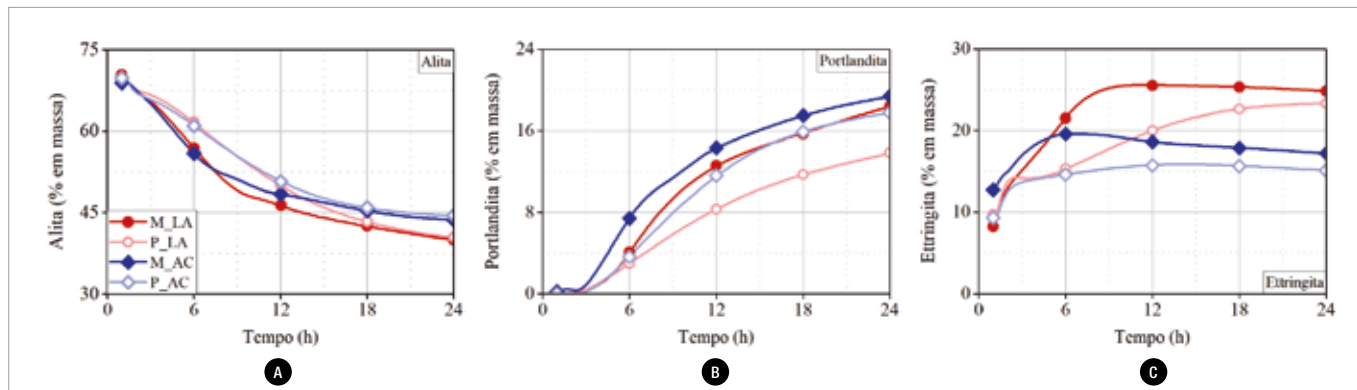
3.1 Calorimetria isotérmica

As curvas de calor de hidratação das pastas misturadas mecanicamente e projetadas de 0 a 24 h estão na figura 3.a e de 1,0 a 1,5 h na figura 3.b. O período entre 1,0 e 1,5 h se refere à adição do acelerador e consequente formação de etringita. Neste documento, este pico é identificado como 'pico do acelerador'.

As curvas indicam que a velocidade da reação do acelerador (inclinação da parte ascendente do pico do acelerador) e a energia liberada por sua reação com cimento (área abaixo da curva entre 1,0 e 1,5 h) são mais de duas vezes maior em



► **Figura 3**
Curvas de fluxo de calor de 0 a 24 h (a) e de 1,0 a 1,5 h (b)



► **Figura 4**

Evolução da concentração de alita (a), portlandita (b) e etringita (c) nas pastas misturadas mecanicamente e nas projetadas

pastas projetadas do que nas pastas misturadas mecanicamente. Isso é observado para os dois tipos de acelerador. Portanto, pode ser concluído que a reatividade do acelerador é controlada pela sua homogeneização na pasta, sendo a mistura dos íons contidos na solução do acelerador com o cimento a etapa limitante da velocidade da reação. Quanto maior a energia de mistura do acelerador na pasta, maior a velocidade de reação.

A cinética de hidratação posterior à adição do acelerador também é influenciada pelo processo de mistura. A velocidade de reação e a energia liberada no pico principal das pastas projetadas é mais baixa que das pastas misturadas mecanicamente. Como a reação do acelerador é mais rápida nas pastas projetadas, aluminatos hidratados, responsáveis pelo processo de pega da pasta de cimento, são formados em maior quantidade nessas pastas. Como as reações de hidratação dos aluminatos consomem sulfato para a formação de etringita (trisulfoaluminato de

cálcio, fase Aft) e, posteriormente, monosulfoaluminato de cálcio (fase AFm), o consumo de sulfatos presentes no cimento também é mais rápido, o que acelera as reações do C_3A do cimento. Tal fato pode ser observado pelo ombro na curva P_AC, que representa a formação de fases AFm (SALVADOR et al., 2017). A formação acelerada de fases AFm preenche os espaços vazios da matriz, limitando a hidratação da alita.

3.2 DRX

A evolução da composição das fases nas pastas misturadas mecanicamente e nas projetadas está apresentada na figura 4. Para simplificar a interpretação dos gráficos, apenas as fases alita, portlandita e etringita estão identificadas.

Nas pastas misturadas mecanicamente, a hidratação da alita ocorre em maior extensão e velocidade até as 24 h, formando uma maior quantidade de portlandita consequentemente¹. A concentração de etringita é a mais influenciada pelo

processo de mistura, principalmente quando o acelerador AC é utilizado, pois esse acelerador não contém sulfatos em sua composição.

Uma possível explicação para esse fato é que a etringita é formada rapidamente durante a projeção, atingindo um grau de cristalinidade mais baixo que nas pastas misturadas mecanicamente. Além disso, a etringita formada durante o processo de projeção pode não estar orientada adequadamente para a medida de DRX. No caso de cristais cuja morfologia é acicular, a orientação difusa diminui a intensidade dos raios difratados. Por esses motivos, sua quantificação por DRX fica comprometida a curtas idades. Com o decorrer da hidratação, a nucleação dos cristais de etringita promove o crescimento de cristais regulares, aumentando a intensidade dos raios difratados.

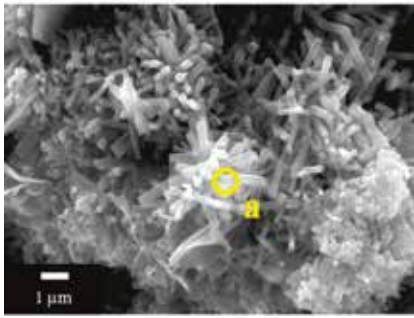
3.3 MEV e microanálise química por EDS

Os resultados obtidos na análise por MEV com as pastas M_LA, P_LA,

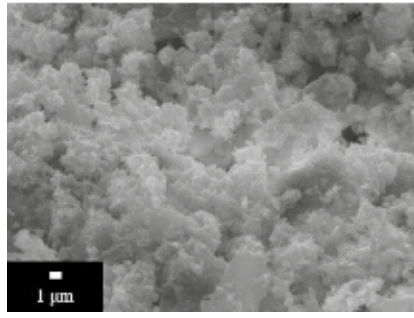
¹ ALITA, COMPOSTA MAIORITARIAMENTE POR SILICATO TRICÁLCICO, É O PRINCIPAL COMPONENTE DO CIMENTO PORTLAND. SUA REAÇÃO COM ÁGUA GERA C-S-H (SILICATO DE CÁLCIO HIDRATADO) E PORTLANDITA (HIDRÓXIDO DE CÁLCIO). C-S-H É A FASE RESPONSÁVEL PELO DESENVOLVIMENTO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS. PORTLANDITA É UM SUBPRODUTO DA HIDRATAÇÃO DA ALITA, QUE MANTÉM O pH DA MATRIZ ENTRE 12 E 13 E É A FASE RESPONSÁVEL PELA PASSIVAÇÃO DAS ARMADURAS.



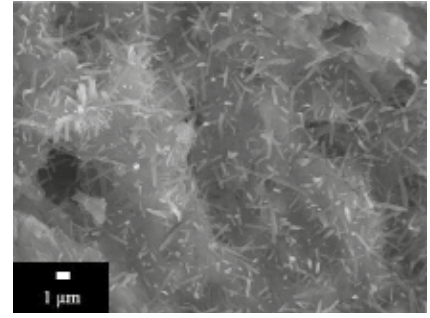
* Ca : Si : Al : S : Na = 100 : 30,5 : 27,6 : 41,4 : 3,9



A



B



C

► **Figura 5**
Pasta M_LA aos 15 min (a), 3 h (b) e 12 h (c)

M_AC e P_AC estão nas figuras 5, 6, 7 e 8, respectivamente. As regiões analisadas pelo EDS estão indicadas por um círculo amarelo na imagem correspondente. Os resultados obtidos nos espectros EDS são representados como as intensidades relativas de cada elemento, colocadas acima de cada imagem. Os picos considerados para medir a intensidade de Ca, Si, Al, S e Na são correspondentes às energias de 3,73; 1,78; 1,52; 2,33 e 1,1 keV, respectivamente.

Na pasta M_LA aos 15 min (Figura 5.a), observa-se grande pro-

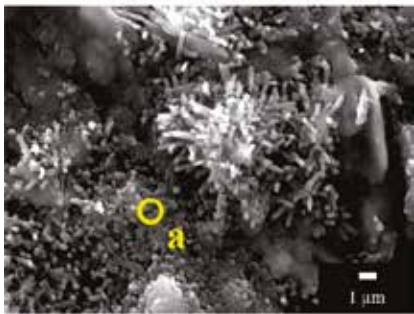
gresso da reação do acelerador, pela grande quantidade de cristais de etringita medindo cerca de 2 µm de comprimento, precipitados na superfície das partículas. Esses cristais nucleiam e precipitam na morfologia de agulhas hexagonais com terminações planas em uma estrutura ordenada. A relação molar entre alumínio e enxofre (razão Al/S) encontrada na região analisada é igual a 0,667, que é o valor exato encontrado na etringita pura.

A pasta P_LA aos 15 min (Figura 6.a) apresenta microestrutura menos

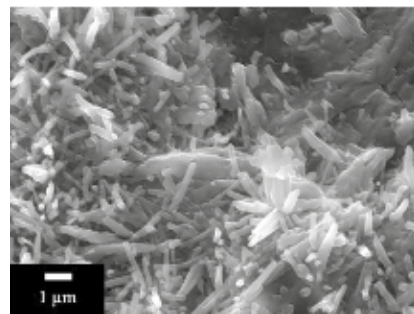
organizada, composta principalmente por cristais de aluminatos hidratados muito dispersos e difusos. Os cristais de etringita apresentam terminações arredondadas e medem 1,5 µm de comprimento, aproximadamente. A diferença na morfologia é causada pela reação mais rápida devido ao processo de projeção. A região analisada por EDS identifica uma razão Al/S igual a 0,93, que indica a coexistência de fases AFt e AFm na superfície da partícula de cimento.

Após 3 horas de hidratação, a microestrutura é mais densa e uma

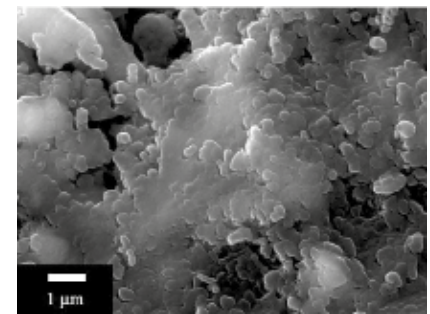
* Ca : Si : Al : S : Na = 100 : 24,6 : 18,0 : 19,3 : 2,5



A

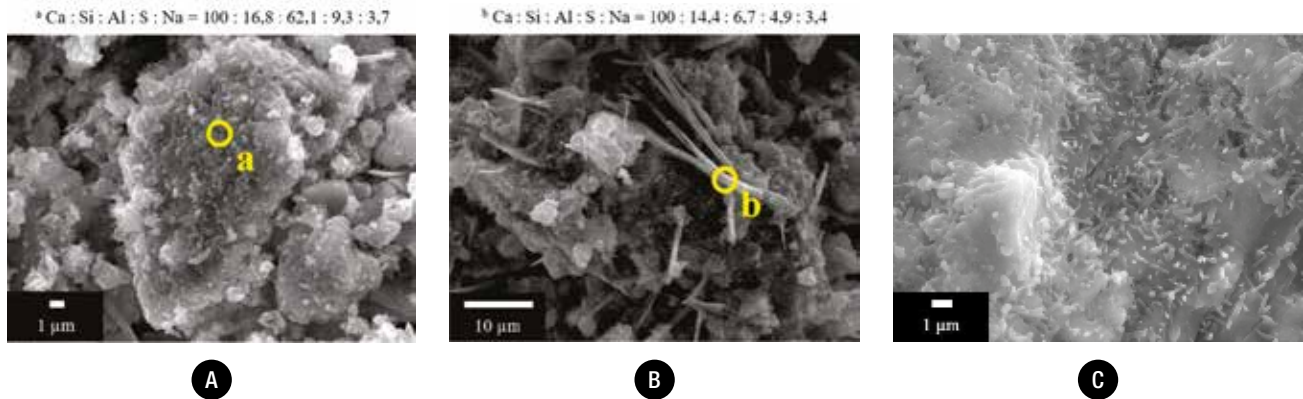


B



C

► **Figura 6**
Pasta P_LA aos 15 min (a), 3 h (b) e 12 h (c)



► **Figura 7**
Pasta M_AC aos 15 min (a), 3 h (b) e 12 h (c)

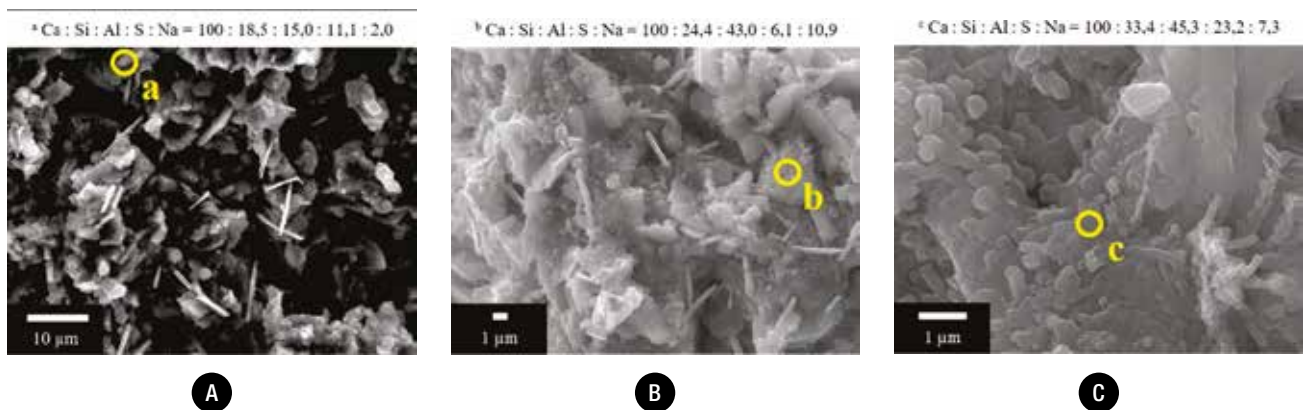
área maior é coberta por produtos de hidratação (principalmente C-S-H e Aft) na pasta M_LA (Figura 5.b). Na pasta P_LA (Figura 6.b), as agulhas de etringita cresceram e medem aproximadamente 2 μm de comprimento. Apesar disso, sua morfologia não apresenta o mesmo arranjo que nas pastas misturadas mecanicamente, sendo ainda caracterizada por agulhas de orientação difusa. Esse resultado corrobora a hipótese descrita na seção 3.2 e os dados obtidos na DRX (a microestrutura desarranjada leva à quantifi-

cação de menores teores de etringita por DRX).

A pasta M_LA às 12 h (figura 5.c) apresenta muitos cristais de etringita na superfície das partículas de cimento. Na pasta P_LA (Figura 6.c), as partículas de cimento apresentam uma grande superfície coberta por C-S-H e hidratos de aluminato. A formação de etringita altamente dispersa e outros hidratos de aluminato pode diminuir a taxa de dissolução de alita e limitar a hidratação adicional devido ao preenchimento de espaço. Essa é uma explicação

plausível sobre o motivo da pasta projetada com o acelerador LA apresentar menor grau de hidratação do que a pasta misturada mecanicamente. Tais resultados estão alinhados com as observações derivadas da análise das curvas de fluxo de calor (Figura 3).

Em relação à utilização do acelerador AC, a pasta M_AC aos 15 min (Figura 7.a) apresenta grande quantidade de fases hidratadas precipitadas na superfície da partícula de cimento. De acordo com o espectro de EDS, os hidratos apresentam



► **Figura 8**
Pasta P_AC aos 15 min (a), 3 h (b) e 12 h (c)



relações Al/Ca, Si/Ca e Al/S iguais a 0,62, 0,168 e 6,7, respectivamente, indicando que podem ser compostos pelas fases C-A-H e AFm, com baixos teores de C-S-H. Tais compostos são formados pela reação rápida do acelerador com íons cálcio, bem como pela hidratação de C_3A em um meio com conteúdo de sulfato limitado. Na pasta P_AC aos 15 min (figura 8.a), os hidratos apresentam uma relação Al/S igual a 1,35 e podem ser compostos principalmente pelas fases AFm.

As pastas M_AC e P_AC na idade de 3 h (figuras 7.b e 8.b) apresentam grande progresso nas reações de hidratação. A pasta P_AC contém hidratos na morfologia de placas hexagonais, que apresentam uma relação Al/S igual a 7,0 e um teor elevado de sódio. Esse hidrato pode ser uma fase-U, formada pela inclusão de íons sódio na estrutura do monosulfoaluminato de cálcio. Como é uma fase derivada do monosulfoaluminato de cálcio, também pode ser considerada uma fase AFm (LI; BESCOP, 1996).


O processo de mistura influencia significativamente a morfologia e a dispersão dessa fase AFm. Este hi-

drato apresenta diâmetros variando de 12 a 40 μm e tende a aglomerar-se em pastas misturadas mecanicamente (Figura 7.b). No entanto, o diâmetro médio dessa fase nas pastas projetadas é de 3 μm e sua dispersão é bastante homogênea (Figura 8.b). Essa diferença na microestrutura é causada pelas condições de alto cisalhamento durante a projeção, da mesma forma que as pastas produzidas com o acelerador LA.

A pasta M_AC na idade de 12 h apresenta cristais de AFt distribuídos por toda a matriz (Figura 7.c). Na pasta P_AC (Figura 8.c), os hidratos apresentam uma relação Al/S igual a 2,0, sendo compostos pelas fases AFm e C-A-H. De acordo com (SALVADOR et al., 2016a), as fases AFm e C-A-H precipitadas na superfície de uma partícula de cimento contribuem para reduzir o grau de hidratação da alita em pastas contendo acelerador alcalino. Esse fato justifica o menor grau de hidratação medido às 24 h nas pastas projetadas.

4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tiradas a partir dos resultados obtidos:

- ▶ O processo de projeção melhora a reatividade do acelerador e acelera a hidratação do C_3A . Consequentemente, a hidratação da alita é limitada, levando a menores graus de hidratação;
- ▶ A velocidade de reação do acelerador é controlada pela sua homogeneização na matriz. Quanto mais eficiente sua homogeneização, mais rápida é a reação;
- ▶ A formação acelerada de fases AFm preenche os espaços vazios da matriz e reduz a velocidade de hidratação do cimento. Tal fato é observado principalmente nas pastas com o acelerador AC produzidas por projeção;
- ▶ O processo de mistura influencia a microestrutura da matriz significativamente, alterando a morfologia, a composição e a distribuição das fases hidratadas formadas pela reação do acelerador;
- ▶ O processo de projeção proporciona maior sensibilidade na análise da reatividade dos aceleradores e deve ser utilizado na produção de matrizes para caracterização de sua composição mineralógica e microestrutural. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GALOVARDES, I. et al. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, v. 79, p. 357–369, 2015.
- [2] JULLAND, P. et al. Effect of mixing on the early hydration of alite and OPC systems. *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 9, p. 1175–1188, 2012.
- [3] LI, G.; BESCOP, P. LE. The U phase formation in cement-based systems containing high amounts of Na_2SO_4 . *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 1, p. 27–33, 1996.
- [4] SALVADOR, R. P. et al. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 386–398, 2016a.
- [5] SALVADOR, R. P. et al. Parameters controlling early age hydration of cement pastes containing accelerators for sprayed concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 89, p. 230–248, 2016b.
- [6] SALVADOR, R. P. et al. Relation between chemical processes and mechanical properties of sprayed cementitious matrices containing accelerators. *Cement and Concrete Composites*, v. 79, p. 117–132, 2017.
- [7] SALVADOR, R. P. et al. On the use of blast-furnace slag in sprayed concrete applications. *Construction and Building Materials*, v. 218, p. 543–555, 2019.
- [8] SALVADOR, R. P. et al. Influence of accelerator type and dosage on the durability of wet-mixed sprayed concrete against external sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 239, p. 117883, 2020.
- [9] XU, Q.; STARK, J. Early hydration of ordinary Portland cement with an alkaline shotcrete accelerator. *Advances in Cement Research*, v. 17, n. 1, p. 1–8, 2005.

Evento na Regional MS

No último dia 6 de março foi realizado o evento Construir é Cuidar da Engenharia no Sinduscon-MS, em Campo Grande, com

realização da MC e Alvo Engenharia. A diretora regional do IBRACON na região, Profª Sandra Regina Bertocini mediou as discussões,

com João Felipe Martins Abdala. O evento, que contou com 25 profissionais, teve apoio do IBRACON e da Alconpat.

Reunião na Regional DF

Sinduscon – DF e a Diretoria de Materiais, Tecnologia e Produtividade (DIMAT) realizaram sua primeira reunião no último dia 6 de março, em Brasília. Na ocasião foi realizada a pa-

lestra “Recuperação do viaduto das tesourinhas do Plano Piloto: um transito necessário – o estado da arte da recuperação”, com os palestrantes Pedro Henrique de La Rocque Ferreira

(Construtora LDN) e Renato Cortopassi (Kalil Engenharia), este diretor técnico do IBRACON na região.

O evento contou com apoio da Ademi e da ABCP.

Curso sobre corrosão e proteção catódica

Curso básico de corrosão e proteção catódica de armaduras de aço em obras de concreto foi realizado no úl-

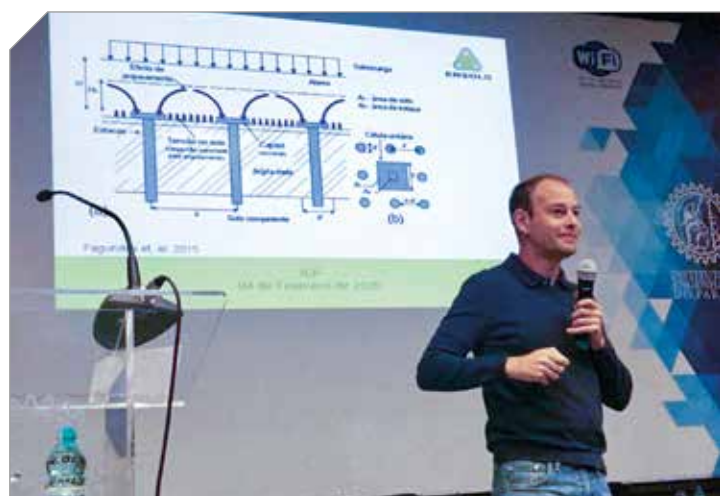
timo dia 6 de março, no Rio de Janeiro. Realizado pela Associação Brasileira de Corrosão (Abraco), o curso foi ministrado

pelo Eng. Luiz Paulo Gomes, diretor da IEC (Instalações e Engenharia de Corrosão), e contou com apoio do IBRACON.

Eventos na Regional PR

IDD e o Instituto de Engenharia do Paraná realizaram no último dia 4 de fevereiro, no Centro de Eventos do IEP, o 5º Seminário Paranaense de Obras Civis.

O evento buscou disseminar conhecimentos de pavimentação urbana e rodoviária, de estruturas pré-fabricadas e de fundações e contenções. Com participação de 250 profissionais, o evento contou com o patrocínio do CredCrea e da Sika.



Luiz Olavo, engenheiro da Ensolo, palestra sobre reforço de fundações com estaca raiz de concreto

Já, no dia 3 de março, o IDD e o IEP realizaram o evento “1st BIM, Lean and Sustainability Conference”, no IEP, para dis-

seminar conhecimentos atualizados sobre esses conceitos.

O evento teve 350 profissionais e recebeu o patrocínio da Rogga Engenharia.



Público presente no evento 1º BLSC

Conheça as mais modernas soluções para construção, recuperação e impermeabilização de túneis.

Soluções para TBM | Aditivos para Concreto
Cristalizantes | Mantas de PVC | Sistemas de Injeção

Túneis estão em contato constante com o solo e, conseqüentemente, sujeitos a diversos problemas provenientes de infiltrações, umidade e ataque químico, resultado da elevada concentração de dióxido de carbono. Há mais de 50 anos a MC fornece soluções que aumentam a produtividade durante a etapa construtiva, impermeabilizam e protegem a estrutura, garantindo uma maior vida útil e permitindo uma utilização mais segura.

Conheça mais sobre nossas soluções através do site:
www.mc-bauchemie.com.br

EXPERTISE
TÚNEIS

MC
CONSTRUIR É CUIDAR

1 a 4 de setembro
de **2020**

Florianópolis – SC

USO E OPERAÇÃO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO



62º

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

IBRACON 2020

Cotas de Patrocínio e Exposição

- Excelentes oportunidades para divulgação, promoção e relacionamento
- Espaços comerciais na XVI FEIBRACON Feira Brasileira da Construção em Concreto
- Palestras técnico-comerciais no Seminário de Novas Tecnologias
- Inscrições gratuitas no evento



TELEFONE
(11) 3735-0202

E-MAIL
arlene@ibracon.org.br

Concursos

- Concursos Técnicos Estudantis
- APO
- Concrebol
- Cocar
- Ousadia
- Concreto: Quem Sabe Faz Ao Vivo
- Artigo do Ano
- Slogan IBRACON

Consulte os
Regulamentos e Participe!



Mais informações:

www.ibracon.org.br

[ibraconOffice](https://www.facebook.com/ibraconOffice)

office@ibracon.org.br

[ibraconOffice](https://twitter.com/ibraconOffice)

Av. Queiroz Filho, 1.700 – sala 407/408 – Torre D – Villa Lobos Office Park – 05319-000 – Vila Hamburguesa – São Paulo – SP – Tel. (11) 3735-0202