



Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil

ISSN 0103-9830
BT/PCC/183

**Concreto Projetado como
Revestimento de Túneis**

**Giovanni Palermo
Paulo Helene**

São Paulo - 1997

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Boletim Técnico - Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Célio Taniguchi
Vice-Diretor: Prof. Dr. Eduardo Camilher Damasceno

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Vahan Agopyan
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Paulo Helene

Conselho Editorial
Prof. Dr. Alex Abiko
Prof. Dr. Francisco Cardoso
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes Marraccini Gonçalves
Prof. Dr. Paulo Helene
Prof. Dr. Vahan Agopyan

Coordenador Técnico
Prof. Dr. Alex Abiko

O Boletim Técnico é uma publicação da Escola Politécnica da USP/Departamento de Engenharia de Construção Civil, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

Este texto é resumo da dissertação de mestrado de mesmo título, que se encontra à disposição com os autores ou na biblioteca da Engenharia Civil.

Palermo, Giovanni

Concreto projetado como revestimento de túneis /
G. Palermo, P.R.L. Helene. -- São Paulo : EPUSP,
1997.

p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica
da USP, Departamento de Engenharia de Construção
Civil, BT/PCC/183)

1. Concreto projetado 2. Túneis - Revestimento
I. Helene, Paulo Roberto do Lago II. Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Sé-
rie

ISSN 0103-9830

CDU 691.32
624.19

CONCRETO PROJETADO COMO REVESTIMENTO DE TÚNEIS

RESUMO

Este trabalho apresenta os métodos construtivos de túneis dentro de uma visão crítica de margem de segurança, durabilidade e custo dos revestimentos de concreto.

São registrados diversos procedimentos normalmente adotados pelos “tuneleiros”, sendo estes revalidados ou criticados dentro da ótica de durabilidade e nível de estaqueidade mínimos necessários aos túneis.

Detalha cronologicamente o entrosamento entre os engenheiros de túneis, os geólogos e os tecnologistas de concreto, ocorrido nos últimos 20 anos, que permitiu grandes saltos tecnológicos no setor de construção de túneis, tais como, o emprego do concreto convencional e projetado de baixa permeabilidade.

Registra os passos pioneiros da engenharia nacional no emprego do concreto projetado como revestimento de túneis escavados pelo método NATM em solo.

Sob o ponto de vista de durabilidade apresenta análises das metodologias de ensaios e dos seus respectivos limites normalmente especificados, e procede a uma avaliação comparativa do desempenho de alguns túneis em operação.

O ganho de conhecimento obtido através da consolidação crítica das tecnologias e práticas recomendadas empregadas nestes últimos 20 anos foram associadas com pesquisa especialmente realizada para identificar novos potenciais do material concreto projetado, que permitiu a formulação de uma nova proposta de especificação de concreto para túneis.

Fornece ainda subsídios para a determinação dos custos dos revestimentos de túneis visando melhorar a qualidade de decisão na escolha de métodos construtivos.



INTRODUÇÃO

O Novo Método Austriaco de Túneis - NATM vem nos últimos anos se estabelecendo como um método de importante papel na construção de túneis. seja pelo seu menor custo seja pela simplicidade envolvida.

Associado a esse ganho de importância do NATM está a do concreto projetado, que tem seu lugar assegurado como principal elemento de viabilização do método.

É de fundamental importância o registro dos passos no desenvolvimento e fixação da tecnologia envolvida; a análise crítica do estado do conhecimento de então; a avaliação das especificações que nortearam a construção das obras existentes; a observação criteriosa dos ensaios e resultados obtidos; e da condição de operação das obras executadas. Somente com esse panorama e com a constatação atual e futura da “qualidade”, no sentido mais amplo, das obras construídas, é possível, reavaliar diretrizes e parâmetros; e aferir conceitos e conhecimentos, de forma a nortear os passos seguintes, possibilitando o desenvolvimento da tecnologia para a viabilização de obras de melhor qualidade a um menor custo.

O NATM que inicialmente foi utilizado praticamente de forma empírica, empregando o concreto projetado com os mesmos parâmetros, ensaios e técnicas que norteavam a análise do concreto convencional, teve nos últimos anos, apesar de insuficiente, muito conhecimento incorporado sobre o material concreto e sua interação com o processo NATM.

Nem essa interação é amplamente dominada e já se atribui ao concreto projetado a responsabilidade de revestimento definitivo.

Este caso de ganho de responsabilidade foi bastante peculiar, pois assim como ocorreu no concreto convencional de baixa permeabilidade o emprego do concreto projetado como estrutura definitiva não se alicerçou em pesquisa fundamental, mas sim numa criativa adequação de procedimentos executivos dentro de um quadro de se utilizar o que normalmente existe disponível.

SHOTCRETE USEFUL FOR TUNNEL REVETMENT

ABSTRACT

This technical paper presents construction methods of tunnels - within a critical vision of safety margin, durability and cost of the concrete revetments. Various procedures are normally used by "tunnel makers", and they are either revalidated or criticised from the point of view of the minimum durability and staking that are necessary for tunnels.

It also gives full account, chronologically, of the interplay among tunnel designers, geologists and concrete technologists during the last twenty years, that made it possible to obtain great technological improvements in the tunnel construction field of activity, such as the use of low permeability conventional concrete, and shotcrete.

The paper also records the first and pioneer steps of Brazilian engineering in the use of shotcrete as a revetment of tunnels excavated in soil, with the NATM method.

From the durability point of view, it proposes an analysis of the test methodologies and their respective limits normally specified, and makes a comparative evaluation of the performance of several tunnels presently in use.

The knowledge acquired through the critical consolidation of the recommended technologies and practices employed in the two past decades was associated with a research that was specially planned to identify new potentials of the shotcrete material, that allow to propose a new specifications of shotcrete for tunnels.

It also provides subsidies for determining the cost of tunnels revetments, in order to improve the quality of decision for selecting construction methods.

Assim a presente dissertação visa resgatar o histórico da construção de túneis no Brasil e no mundo, relatando o importante papel do NATM e o ganho de conhecimento adquirido ao longo dos anos de utilização.

Objetiva ainda registrar a experiência consolidada na determinação de custo e, como resultado de uma avaliação entre as especificações aplicadas, dos resultados obtidos e da condição das obras hoje em operação, propõe novas especificações para o material concreto projetado para utilização em túneis escavados pelo método NATM.

“...Haverá o dia em que todos os acontecimentos em campo foram previstos no projeto; em que os resultados das análises de laboratório fornecerão as reais medidas das condições das obras e, quem sabe, os registros, as análises, as reavaliações e as novas propostas não sejam mais necessárias.”

O objetivo deste artigo é expor alguns dos aspectos discutidos na dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo Engenheiro Giovanni Palermo, orientado pelo Dr. Paulo Roberto do Lago Helene, onde enfoca-se o emprego e o desempenho do concreto projetado como revestimento de túneis sob a ótica de durabilidade, estanqueidade e custo.

1 EVOLUÇÃO DOS PROJETOS DE REVESTIMENTOS DE TÚNEIS

O emprego de túneis para a solução de vários problemas urbanos vem crescendo nos últimos 30 anos. A conferência da OECD de 1969, para sistemas subterrâneos de trânsito rápido, em Washington, estimou em 1.730 km para o período de 1970-80, e mais de 2.000 km na década de 80, contra os 664 km construídos no período de 1950-60. Na década de 90 grandes obras já foram realizadas tais como os túneis submarinos de Seikan, no Japão, com mais de 53 km, e o Eurotúnel que ligou a Inglaterra à França.

Sempre houve uma grande discussão entre o empreendimento em nível e o subterrâneo. Levantamentos realizados pelos britânicos na década de 70 demonstraram que o empreendimento subterrâneo geralmente custa 8% mais caro que o em nível. Mas, eles são unânimes em dizer que quando for possível a construção de um empreendimento enterrado, este deve ser adotado pois as vantagens sociais são enormes. É claro que a escolha depende da topografia, desvios dos serviços existentes, tipo de terreno, geometria horizontal e vertical. O metrô de Paris apresentou custos de desvios de tráfego correspondente a 20% do custo da obra civil.

A partir de 1970 surge um método revolucionário na construção de túneis urbanos, trata-se do NATM, na verdade uma adaptação de métodos mineiros de construção de túneis. Hoje, sua aplicação encontra-se em crescimento em todo o mundo, mesmo nos países altamente industrializados, onde existe grande disponibilidade de equipamentos tipo "shield". O seu crescimento com certeza levará a um incremento do consumo do concreto projetado, o que exigirá um conhecimento cada vez maior das suas propriedades.

Muito ainda há que se aprender sobre este versátil material, pois propriedades como módulo de elasticidade, efeito Rush, deformação lenta são ainda uma grande incógnita técnica, e o seu conhecimento poderia trazer grandes benefícios no setor de dimensionamento dos revestimentos e previsão de coeficientes de segurança dos túneis. Hoje, pela insuficiência de conhecimento os projetos podem estar muito conservadores ou muito arrojados. No primeiro caso ter-se-ia um amplo campo para minimizar custos, e no segundo poder-se-ia investir na melhoria dos coeficientes de segurança e na durabilidade da obra.

Não se deve esquecer que o revestimento definitivo em concreto moldado "in loco" prescinde da colaboração do maciço, enquanto que o revestimento de concreto projetado tem que contar com ela. Este aspecto é polêmico para túneis urbanos, pois no futuro poderiam impor rígidos limites de utilização do espaço urbano subterrâneo. Tem-se aqui mais um bom motivo para se estudar com maior profundidade a interação concreto projetado com o maciço dentro da filosofia construtiva NATM.

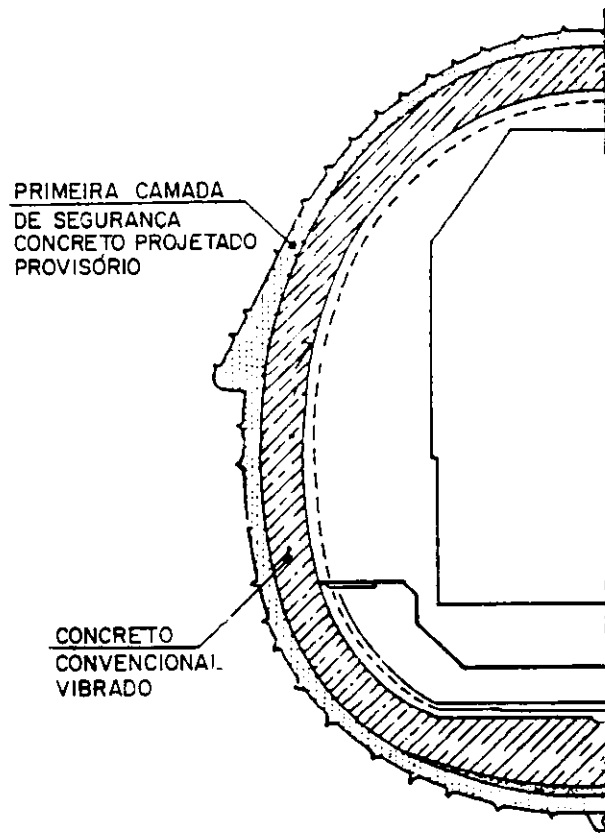
Muitas universidades nos últimos anos vem intensificando o estudo do concreto projetado destacando-se Salzburg na Áustria, Bochum na Alemanha, Columbia na Inglaterra, Alberta no Canadá, e São Paulo no Brasil.

A engenharia nacional não está acomodada nos louros do seu pioneirismo no emprego do NATM em solo e do concreto projetado como estrutura definitiva para confeccionar túneis urbanos. Ela continua investindo na melhorias dos processos, e tem exportado esta tecnologia, como no metrô de Lisboa em Portugal.

É importante lembrar que ainda hoje, na Europa e nos Estados Unidos se emprega o concreto projetado como revestimento provisório, quando se trata de túneis em maciços diferentes de rocha auto-portante. Nestes casos o revestimento primário em concreto projetado é provisório e caberá ao revestimento secundário, em concreto convencional, suportar a carga total do maciço “caso o concreto projetado se degrade”. As Figuras 1 e 2 evidenciam as principais diferenças entre os projetos convencionais e aqueles que empregam o concreto projetado como revestimento definitivo em túneis.

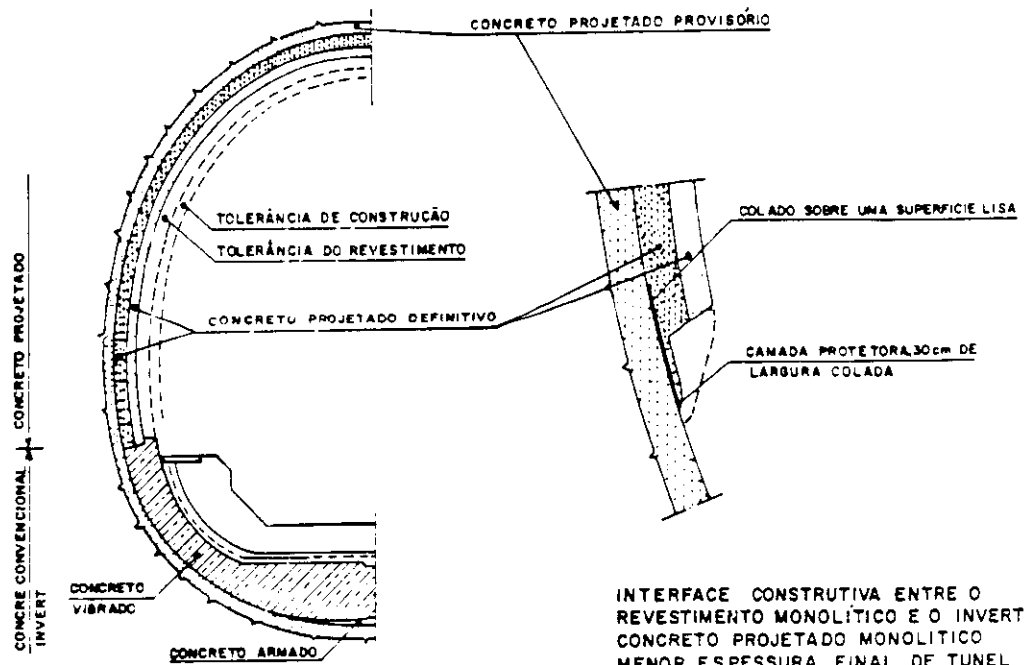
O material concreto projetado é muito versátil e apresenta excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade quando bem executado. Hoje é possível se especificar este material como responsável por obras de saneamento e até mesmo marítimas apesar da alta agressividade do meio. Um trecho do túnel de Vereina na Suíça foi executado empregando-se concreto projetado de f_{ck} 80 MPa. Entretanto, a execução por pessoas inexperientes pode trazer grandes dissabores, como problemas com a incorporação da reflexão, baixa compactidade, baixa resistência, porosidade com infiltrações, fissuras com lixiviação, etc. que podem deteriorar rapidamente o material.

O grande inimigo dos túneis é a água, pois além de causar problemas durante a escavação, ela não permite que se confeccione um revestimento de concreto compacto e integro e; é ela que dispara os diversos mecanismos de deterioração do revestimento de concreto e das instalações dentro do túnel. Pode-se concluir portanto que a arte de fazer túneis nada mais é que a arte de controlar a água.



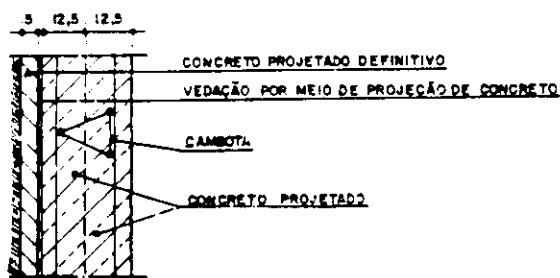
PROJETO TRADICIONAL DE REVESTIMENTO DE TÚNEIS

FIGURA 1

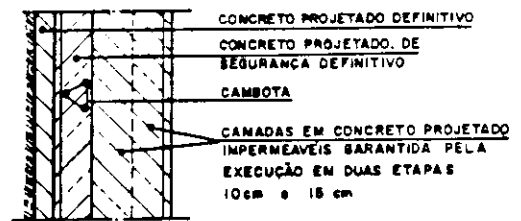


INTERFACE CONSTRUTIVA ENTRE O REVESTIMENTO MONOLÍTICO E O INVERT CONCRETO PROJETADO MONOLÍTICO MENOR ESPESURA FINAL DE TUNEL

REVESTIMENTO EM CONCRETO PROJETADO MONOLÍTICO
TUNEL DO METRÔ DE S. PAULO



VEDAÇÃO COM MATERIAL IMPERMEABILIZANTE



VEDAÇÃO COM CAMADAS DE C.P IMPERMEÁVEIS

PROJETO MODERNO DE REVESTIMENTO DE TÚNEIS

FIGURA 2

LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO

OBRA		Extensão Norte	Eletropaulo	Itaquera/Guai.	Sumaré/V.M.
COMPRIMENTO (m)		663	4.150	1.200	580
IDADE DO EMPREENDIMENTO		14 anos	parcial/ 2 anos	5 anos	em execução
SEÇÃO MÉDIA TRANVERSAL (m ²)		94,5	12	80	73
Infiltração d'água no revestimento do túnel	umidade	23	488	8	112
	gotejamento	1	204	2	87
	jorro	0	0	0	0
	filete (sem vazão)	0	140	0	0
	vazão 1l/min	15	13	6	0
	vazão 2 l/min	0	2	0	0
	vazão 5l/min	0	3	0	0
Infiltração d'água nos drenos do túnel	seco	3	301	43	2
	com umidade	0	132	18	17
	com gotejamento	3	284	9	8
	com jorro 10 l/min	3	3	0	3
	com jorro 20 l/min	0	1	0	0
	filete (sem vazão)	8	70	32	13
	filete 1l/min	0	16	0	2
	filete 2l/min	0	3	0	0
	filete 3 l/min	0	1	0	0
	filete 2 a 3 l/min	0	1	0	0
	filete 5 l/min	0	10	0	0
filete 5 a 10 l/min	0	2	0	0	
Presença de óxido de ferro		1	464	0	4
Presença de carbonato de cálcio		6	287	5	76
Presença de material de cor preta		2	110	0	78
Presença de estalactite		2	3	5	143
Presença de trincas		0	6	0	0
Presença de buracos		0	2	0	0

Nota: Os valores apresentados representam o número de ocorrências encontradas.

TABELA 1

Monitoramentos em estrutura efetuados em quatro túneis de São Paulo, conforme a Tabela 1, demonstraram que estes apresentam-se até o momento em boas condições, mas que apresentam defeitos construtivos hoje já revisados com adoção de novos procedimentos construtivos. Este é o ônus do pioneirismo, isto é, do aprendizado com o erro. Os problemas patológicos não são graves e hoje podem ser sanados com relativa facilidade pelas técnicas de recuperação disponíveis, mas a condição ideal é de não permitir a instalação de mecanismos de deterioração para assegurar uma vida útil compatível com o investimento a um baixo nível de manutenção.

Para maciços adequados ao emprego do NATM ao se executar um túnel empregando o concreto projetado como revestimento definitivo, este tem apresentado custos extremamente vantajosos com relação a outros métodos. Enquanto que túneis singelos de 70 m² estão custando da ordem de US\$9.000,00 por metro linear, no caso do “shield” não sai por menos de US\$21.000,00 o metro linear. A sua vantagem não está somente no custo final, mas na versatilidade do método NATM, que permite sensíveis aumentos de velocidade através da abertura simultânea de várias frentes. Trata-se de um método que exige pequenos investimentos iniciais em equipamentos, isto é, da ordem de US\$250.000,00, enquanto que um “shield” o investimento mínimo é da ordem de US\$1.300.000,00.

A alta competitividade deste método impulsionará o crescimento da utilização do concreto projetado em obras subterrâneas. O custo do revestimento em concreto projetado vem diminuindo sensivelmente nestes últimos dez anos. Enquanto que em 1980 ele custava o equivalente a US\$1100,00 o metro cúbico de estrutura tem-se que hoje os orçamentos apresentam valores médios da ordem de US\$550,00 a 750,00 o metro cúbico de estrutura.

O interesse pela engenharia na melhoria no material concreto projetado está crescendo, pois este poderá minimizar sensivelmente os custos dos túneis.

Este tipo de método construtivo exige inclusive a mudança de relacionamento entre o Projeto e a Obra. Nos métodos de construção de túneis tradicionais a atuação do Projeto e da Obra eram mais estanques com ação física e cronologicamente distintas. O método NATM exige uma retroalimentação do Projeto Inicial sistemática para que sejam efetuados ajustes, o que exige uma interação Projeto-Obra muito maior. Esta nova maneira de trabalhar permite uma sinergia dos conhecimentos podendo gerar soluções verdadeiramente inovadoras e eficazes.

2 DIRETRIZES TECNOLÓGICAS DO MATERIAL CONCRETO PROJETADO PARA SER EMPREGADO COMO REVESTIMENTO DEFINITIVO DE TÚNEIS

Apresenta-se uma proposta de diretrizes de especificação do revestimento de túneis executados pelo processo NATM e empregando o concreto projetado como elemento monolítico e definitivo, com responsabilidade estrutural e de estanqueidade dentro das limitações impostas pelas Tabelas 2 e 3.

DEFINIÇÃO DO GRAU DE ESTANQUEIDADE PARA ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS EM FUNÇÃO DO USO

GRAU DE ESTANQUEIDADE	CARACTERÍSTICAS DA OBRA	USO DO ESPAÇO	AGUA DE INFILTRAÇÃO EM L/m ² POR UM PERÍODO DE 24 HORAS	
			10 m	100 m
1	não é permitido a saída de vapor de mercúrio por difusão	salas secas: salas de ar limpo prolongada permanência de pessoas estocagem de misturas sensíveis (papeis, comida, explosivos, etc.)	0	0
2	seco vapor por difusão permissível	instalações de defesa militar e saunas, salas de fornecimento de energia espaço subterrâneo em geral	0	0
3	seco	estações metroviárias salas de computadores	< 0,002	0,001
4	quase seco	túneis rodoviários de alta velocidade trens ferroviários de alta velocidade	< 0,02	0,01
5	penetração capilar	áreas de estacionamentos de automóveis túneis de passagem de pedestres	< 0,2	0,1
6	pequeno gotejamento	ferrovias regionais túneis metroviários	< 0,5	0,2
7	gotejamento	túneis de saneamento	< 1,0	0,5

TABELA 2

As diretrizes propostas estão subdivididas em três grandes grupos:

- controle do material durante a execução;
- controle do revestimento de concreto (estrutura) durante a execução; e
- recebimento da estrutura acabada.

CRITÉRIO TÉCNICO PARA SELEÇÃO ENTRE LÂMINAS PLÁSTICAS E CONCRETO DE BAIXA PERMEABILIDADE PARA TÚNEIS

NÍVEL DE AGRESSIVIDADE DA AGUA	PRESSÃO DA AGUA ≤ 3 bar	PRESSÃO DA AGUA > 3 bar
baixo	C	C (Ms8 ou P3)
médio	C/Rs (Ms5 ou P3)	C/Rs (Ms10 ou P5)
alto	C/Rs (Ms10 ou P5)	L

Nível de Infiltração permitido em obras de túneis rodo-ferroviários < 0,7 l/m² de revestimento por 24 horas
 C - concreto Rs - cimento com resistência aos sulfatos MsX - microssilica a um teor X% ou polímeros plásticos para um teor Y% L-Lâmina Plástica de 2 mm de espessura

TABELA 3

Estas diretrizes gerenciam as diversas informações dispostas nas normas, e são também, em alguns pontos, complementares, pois dada a especificidade da aplicação do material concreto projetado vê-se a necessidade de maior rigor de alguns parâmetros.

2.1 Controle do Material Concreto Projetado durante a Execução

2.1.1 Materiais

O controle de materiais é fundamentalmente igual ao empregado no caso do concreto convencional a não ser pela compatibilidade cimento-aditivo através da agulha de Guilmore.

2.1.2 Antes da Projeção

Para todo caminhão betoneira controla-se para o caso da via seca a relação água-cimento real através do processo da “frigideira” corrigido pelo teor de cimento; e no caso da via úmida deve-se empregar o Abatimento (NBR-7223).

2.1.3 Após a Projeção

Para cada período de 4 horas de produção controla-se, no mínimo:

- a relação água-cimento real na estrutura (NBR-13044); e
- a resistência a Compressão "in situ" pela Agulha Meynadier (SIA Standards V 198/7) aos 30 minutos, 1e 3 horas.

Pelo menos uma vez a cada 80 m³ controla-se a reconstituição do concreto na estrutura nas seguintes posições da seção do túnel - "invert", paredes laterais e abóbada (NBR-13044).

2.1.4 Concreto Endurecido

Ensaios aos 7 dias de idade, com controle via placa:

- Resistência à compressão axial (NBR-5739);
- Absorção por imersão e fervera (NBR-9778); e
- Penetração de água sob pressão (NBR-10787).

2.2 Controle do Revestimento de Concreto Projetado durante a Execução

Este controle deverá ser realizado no revestimento primário e no revestimento secundário.

Abaixo são apresentados os parâmetros e os valores mínimos que os corpos de provas obtidos da estrutura devem atender à idade de 28 dias. Não é lícito nesta fase controle via placa.

Os locais de extração deverão obedecer a seguinte distribuição:

- os corpos de prova destinados ao local parede lateral deverão ser subdivididos em aproximadamente metade na altura, isto é, entre 0,5 a 1,5 m, e o restante na altura entre 1,5 a 2,5 m; e
- adicionalmente, quando o túnel for confeccionado por cambotas metálicas, os corpos de prova destinados a cada local devem estar localizados 50% entre as cambotas, e os outros 50% a uma distância máxima de 15 cm destas.

As condições de cura dos corpos de prova deverão ser as mesmas das condições impostas ao revestimento.

Para o concreto projetado não armado sugere-se os requisitos abaixo apresentados para túneis rodo-ferroviários. Quando se tratar de túneis de saneamento alguns dos parâmetros poderão exigir outros limites, assim para estes casos serão recomendados os valores entre parênteses e em itálico:

- Resistência à compressão (NBR-5739): $f_{ck} \geq 25$ (30) MPa, calculado segundo os critérios da norma NBR-12655;
- Absorção de água por imersão e fervura (NBR-9778) ≤ 8 (6) %;
- Massa específica aparente seca (NBR-9778) \geq (densidade teórica do traço - 100) kg/dm³;
- Penetração de água sob pressão (NBR-10787) ≤ 50 (30) mm;
- Absorção capilar (SIA 162/1), onde dever-se-ia determinar o coeficiente de absorção angular para a idade de ensaio de 24 horas, obtido do gráfico da curva de desempenho da absorção capilar versus tempo por um período mínimo de duração do ensaio de 15 dias. Os corpos de prova devem ter seus ensaios iniciados à idade de 28 dias. O limite de aceitação dado pelo coeficiente de absorção capilar para a idade de ensaio de 24 horas seria de: $a_{24} \leq 15,0$ (11,0) g/m²/s^{1/2}; e
- Resistividade elétrica - volumétrica e superficial (NBR-9204)
 - revestimento de primeira fase ≥ 10.000 (15.000) Ω .cm;

- revestimento de segunda fase ≥ 25.000 (32000) Ω .cm. Este valor deverá ser de no mínimo 60.000 Ω .cm em obras metroviárias ou ferroviárias que empreguem sistema de tração de corrente contínua.
- Nenhuma armadura estrutural pode estar exposta;
- Nenhuma infiltração através da estrutura de concreto; sendo inaceitáveis aquelas com mecanismo de lixiviação;
- Isenção de fissuras, sendo que toda e qualquer fissura deverá ser consolidada com resinas duráveis. Como diretriz de dimensionamento deve-se ter espessuras mínimas de revestimentos que não acarretem elevada flexibilidade ao conjunto revestimento de concreto-maço, o que significa critérios de dimensionamentos que não induzam demasiadamente a diminuição de espessuras a custa de um comportamento estrutural que provoque microfissuração no concreto para a estrutura em serviço. Estes critérios devem ser evitados, ou quando empregados, devem ser adotados criteriosamente. É importante frisar que sob o ponto de vista de durabilidade é preferível uma única fissura, mesmo que de grandes dimensões, do que uma grande quantidade de microfissuras, pois a quantidade de entrada de agentes agressivos ao concreto por difusão e por absorção capilar é mais elevada, além da maior dificuldade de recuperação.
- Nenhuma segregação ou ninhos de agregados no concreto deve ser verificada na análise visual da estrutura. Quanto a segregação do concreto verificada na análise visual dos corpos de prova extraídos da estrutura, estes devem estar limitados a uma quantidade máxima de 5% do número de corpos de prova obtidos da estrutura. Caso este limite não seja ultrapassado deve-se providenciar sobresspessura do revestimento, de no mínimo 100 mm, e de valor equivalente ao da espessura segregada pela análise de 10 corpos de prova distribuídos em $\frac{1}{2}$ diâmetro de túnel. Estes corpos de prova devem ser distribuídos 75% nas paredes laterais e os restantes 25% na região do teto. Define-se como teto a região executada onde o bico de concreto projetado sofre a inclinação máxima de 30°. Caso não haja gabarito para a sobresspessura de concreto projetado, e a verificação de dimensionamento com uma espessura menor assegure os coeficientes de segurança necessários, o problema se resume aos aspectos de durabilidade da

estrutura. Neste caso deve-se então injetar o maciço com produtos químicos que isolem o contato entre o solo e o revestimento de concreto projetado.

- Verificação do monolitismo do revestimento entre a primeira fase e a segunda fase, onde através dos corpos de prova extraídos da estrutura durante o controle do revestimento de segunda fase dever-se-á ter, no máximo, 30% de ocorrência de rupturas na junção entre a primeira e a segunda fase. Assim sendo, a espessura do corpo de prova do revestimento de segunda fase deverá ultrapassar em 50 mm a sua espessura de projeto. Caso este limite venha a ser ultrapassado o dimensionamento deve ser refeito considerando-se a hipótese de aderência zero entre o revestimento de primeira fase e segunda-fase, o que provavelmente deverá gerar uma sobresspessura no revestimento de segunda fase. Se houver problemas de falta de gabarito para a espessura adicional de concreto projetado os revestimentos de primeira e segunda fase deverão ser fretados através da instalação de chumbadores que os interliguem. Os chumbadores deverão ser fixados com epóxis que polimerizam na presença de água, sendo que a quantidade de pinos será obtida através de dimensionamento para a hipótese de uma penetração máximo do chumbador de $\frac{1}{2}$ da espessura do revestimento de primeira fase;
- Verificação da espessura do revestimento, através da medida direta de todos os corpos de prova extraídos da estrutura, sendo que todos os corpos de prova deverão ter espessura igual ou superior à espessura fixada em projeto para o revestimento;
- O critério de amostragem deverá ser estudado em função da especificidade de cada obra compatíveis com os critérios de dimensionamentos, mas como limite superior do tamanho do lote tem-se que este não deve ultrapassar a 40 metros lineares de estrutura, e a 80m^3 de concreto projetado instalado na estrutura, e a um período máximo de 30 dias corridos. Deve-se adotar como limite máximo o menor entre os critérios apresentados, mas qualquer mudança de materiais ou de fornecedor estabelece-se automaticamente a formação de um novo lote. A Tabela 4 apresenta o número de corpos de prova necessários e os tipos de ensaios com suas características, para a formação de um lote.

- O revestimento de concreto projetado deverá ser monitorado com o objetivo de determinar tensões e deformações que confirmem as hipóteses de dimensionamento.
- Monitoramentos dos seguintes procedimentos executivos:
 - Limpeza integral do material refletido de modo que este não se incorpore à estrutura, especialmente nas regiões próxima à ligação “invert” e parede;
 - As irregularidades do revestimento devem ser preenchidas com concreto projetado de modo que sejam evitadas sombras de projeção, sendo a distância máxima de fixação da armadura em relação à superfície do substrato de 8 cm.
 - Toda vez que se reiniciar a projeção de concreto dentro de uma mesma camada dentro uma mesma fase de concreto projetado deve-se proceder a limpeza com jato de ar e água a uma pressão mínima de 6 kgf/cm²;
 - Deverá ser previsto pelo Projeto a delimitação de áreas para a instalação de chumbadores. Deve ser evitado, tanto na etapa durante a execução como na etapa obra concluída, o emprego de insertos que comuniquem o concreto projetado de primeira fase com o concreto (projetado ou convencional) de segunda fase integrantes do revestimento do túnel; e
 - No caso de túneis em rocha em que tenhamos apenas uma fase de revestimento o chumbador poderá atravessar o revestimento e se apoiar dentro da rocha. Em qualquer caso os chumbadores ou insertos deverão ser instalados com sistema vedante de infiltrações, pois sob nenhuma circunstância estes poderão introduzir infiltrações.

2.3 Recebimento da Estrutura Acabada

O monitoramento de estrutura realizado na fase durante a execução deverá ser incorporado à estrutura e ser repassada ao departamento de manutenção com um respectivo manual e respectivos limites dos parâmetros eleitos para serem controlados.

**FORMAÇÃO DE UM LOTE DE ENSAIOS A SEREM REALIZADOS
EM TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DA ESTRUTURA
PARA O CONTROLE DE ESTRUTURA**

ETAPA CONCLUÍDA PARA 1 LOTE DE 28 DIAS								
LUGAR DA SEÇÃO	VERIFICAÇÃO DE ESPESURA	COMPRESSÃO (NBR-5739) E (2) MÓDULO DE ELASTICIDADE (NBR-8522)	VERIFICAÇÃO DE SEGREGAÇÃO	ABSORÇÃO DE ÁGUA E DENSIDADE (NBR-9778)	PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO (NBR-10787)	ABSORÇÃO CAPILAR (NBR-1621)	RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA (NBR-9294)	CLASSE DE MONOLITISMO
LIMITES	± especificação	≥ 25 MPa NBR-12655	todos os CP do lote	Absorção ≤ 8% Densidade ≥ teorico do traço - 0,1 t/m ³	≤ 5cm	≥ 1 s 15,0 g m ² s ^{1/2}	>10.000 ohm.cm (primário) ≥ 60.000 ohm.cm (secundário)	≤ 30% de ocorrência de juntas nos CP do lote
ABOBADA	2 (I)	2 (IV)	2 (III)	-	-	-	-	2 (II)
PAREDE LATERAL	2 (I)	2 (IV)	2 (III)	-	-	-	-	2 (II)
PISO DEFINITIVO ⁽¹⁾	2 (I)	2 (IV)	2 (III)	-	-	-	-	2 (II)
ABOBADA	2 (I)	-	2 (III)	2 (IV)	-	-	-	2 (II)
PAREDE LATERAL	2 (I)	-	2 (III)	2 (IV)	-	-	-	2 (II)
PISO DEFINITIVO ⁽¹⁾	2 (I)	-	2 (III)	2 (IV)	-	-	-	2 (II)
ABOBADA	1 (I)	-	1 (III)	-	1 (IV)	1 (IV)	-	1 (II)
PISO LATERAL	1 (I)	-	1 (III)	-	1 (IV)	1 (IV)	-	1 (II)
ABOBADA	1 (I)	-	1 (III)	-	-	-	1 (IV)	1 (II)
PISO DEFINITIVO ⁽¹⁾	1 (I)	-	1 (III)	-	-	-	1 (IV)	1 (II)
ABOBADA	1 (I)	-	1 (III)	-	-	-	-	1 (II)
PISO DEFINITIVO ⁽¹⁾	1 (I)	-	1 (III)	-	-	-	-	1 (II)
ABOBADA	1 (I)	-	1 (III)	-	-	-	-	1 (II)
PISO DEFINITIVO ⁽¹⁾	1 (I)	-	1 (III)	-	-	-	-	1 (II)
Total Simples	18	6	16	6	2	2	2	16

Notas:

Total de corpos de prova extraídos da estrutura por Lote para Concreto Projetado Simples: 16

- 1 - Quando o lote não apresentar piso definitivo os corpos de prova estes corpos de prova devem ser igualmente distribuídos entre a abobada e a parede lateral.
- 2 - A seqüência de ensaios para um mesmo corpo de prova é obtida através da leitura na horizontal da Tabela. Os algarismos romanos entre parênteses indicam a seqüência em que os ensaios deverão ser realizados

TABELA 4

O revestimento do túnel deverá apresentar-se conforme as condições de projeto e isentos de defeitos construtivos.

Todos os furos, nichos, embutidos e elementos para fixação deverão ser instalados de modo a não comprometer a estanqueidade do túnel.

Todas as peças metálicas não deverão comunicar o revestimento de primeira fase com o revestimento de segunda fase.

O revestimento dos túneis deverá apresentar-se isentos de quaisquer infiltrações na região do teto, paredes e “invert”, que se manifestem nas formas de gotejamentos, fluxos constantes ou escorrimentos visíveis. Serão admitidas infiltrações difusas (superfícies úmidas ou marcas de umidade localizadas), desde que não apareçam na forma citada no parágrafo anterior, mas no limite disposto na Tabela 2.

A durabilidade do concreto deverá ter sua conformidade comprovada pelos ensaios de durabilidade preconizadas para a etapa em execução atendendo integralmente os limites especificados pelo Projeto.

A superfície de concreto do revestimento do túnel deverá apresentar-se isenta de lixiviação seja através de pontos de porosidade seja através de fissuras.

As juntas e o sistema de vedação deverá permitir acesso fácil para troca no limite da vida útil do material empregado, que nunca deverá ser inferior a 10 anos.

Os raios efetivos da seção do túnel concluído deverá estar em conformidade com o projeto dentro de uma faixa de tolerância de 30 mm acrescido da deformações previstas em projeto.

3 A LIMITAÇÃO DO CONHECIMENTO

Apesar de ser possível sugerir diretrizes para melhorar o grau de confiabilidade sobre a durabilidade de revestimentos de túneis executados em concreto projetado, ainda se faz necessário ganho de conhecimento na área de desempenho da estrutura frente aos seus diversos usos. As estruturas executadas são jovens, de modo que não se tem conhecimento sobre a sua velocidade de degradação, e qual será o mecanismo de deterioração frente à agressividade do meio e dos efeitos mecânicos devidos aos critérios de dimensionamentos. Estes temas precisam ser investigados cientificamente.

Neste trabalho ficou claro que atualmente a margem de segurança do concreto convencional ainda é muito maior que a do concreto projetado. Desta maneira, para se melhorar o desempenho de estruturas de túneis executados em concreto projetado deve-se investir na melhoria da qualidade deste concreto através do desenvolvimento de cimentos especiais, que dispensem o emprego do aditivo acelerador, e de adições à base de polímeros plásticos, de modo a melhorar a sua performance garantindo a sua integridade no caso de ação das águas do lençol freático, assegurar baixa porosidade do concreto, fornecer um grau elevado de coesão interna para tornar a reflexão próxima de zero, e permitir comportamento estrutural compatível com grandes deformações. Qualquer estudo não pode estar dissociado do comportamento estrutural esperado em função da mecânica imposta pelo método NATM em solo. Assim, propriedades como deformação lenta, velocidade de crescimento do módulo de elasticidade, e coeficiente de Poisson são importantíssimos nestes estudos. Estas adições ao concreto projetado deverão atender as expectativas estruturais de se ter um material cada vez mais flexível, porém resistente, para permitir um bom desempenho da interação solo-estrutura, minimizando o grau de microfissuramento interno. Assim como o conhecimento da interação entre o aço e o concreto, que é utilizado a mais de 100 anos é preciso, com o desenvolvimento dos plásticos, polímeros e resinas estudar e identificar novos materiais, que venham a cumprir com maior eficiência, as exigências mecânicas, de perenidade e de custo, hoje solicitadas pelas obras de construção civil, e em especial os revestimentos de túneis.

Referências Bibliográficas

- (1) ASSOCIAÇÃO JAPONESA DE TECNOLOGIA DE TÚNEL. **Relatório de Pesquisa sobre concreto projetado**, Japão, 1980
- (2) BEAUPRÉ, D. **Rheology of High Performance Shotcrete**. Thesis Ph D, The University of British Columbia, Fev. 1994
- (3) CREMONINI, R.A.; JOHN, V.N. **Avaliação da Durabilidade por Levantamento de Campo**. II Simpósio Nacional de Materiais de Construção sobre Durabilidade dos Materiais e Componentes da Construção Civil (EPUSP), outubro, 1988.

- (4) CRUZ, H.J.V.; COUTO, J.V.S., HORI, K., SALVONI, J.L., FERRARI, O.A. **Os túneis do Prolongamento Norte- Uma primeira avaliação do NATM em área urbana.** In: Segundo Simpósio de Escoramentos Subterrâneos, Rio de Janeiro, 1982. Rio de Janeiro, ABGE, 1982.
- (5) DOMINGUES, L. C. S.; PALERMO, G. **A introdução da segurança no projeto de túneis NATM em solo.** In: Segundo Simpósio de Escoramentos Subterrâneos, Rio de Janeiro, 1985. Rio de Janeiro, ABGE, 1985.
- (6) EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS OF SPECIALISTS CONTRACTORS AND MATERIAL SUPPLIERS FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY-EFNARC. **Specification for Sprayed Concrete- Final Draft, oct., 1993**
- (7) FENNER, H.F. **Chemicals for Tunnel Waterproofing,** Palestra apresentada na Cia do Metropolitano de São Paulo sobre novas tecnologias, novembro, 1992.
- (8) FIGUEREDO, A.D. **Concreto Projetado: Fatores Intervenientes no Controle da Qualidade do Processo.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 1992.
- (9) GEBAUER, B. **The single permanent shotcret lining method for the construction of galleries and traffic tunnels - The result of practice-oriented research and application.** Dyckerhoff & Widmann AG, Muchen, 1992. pp 41-58
- (10) HENTSCHEL, J. **Vereina Tunnel: no trouble reaching St. Moritz even in Winter, Sonderdruck aus Tunnel, 3, 1993.**
- (11) HORI, K. **Túneis Mecanizados,** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, novembro, 1996.
- (12) MAIDL, B. **Handbuch fur Spritzbeton,** editora Gluckauf, Essen, 1992
- (13) MARTIN, D. **Dry run for Washington metro gives NATM an American boost. Tunnels & Tunnelling, May, 1987**
- (14) MEHTA, P.K. **Durability of Concrete- Fifth Years of Progress? ACI SP 126 e Durability of Concrete, Second International Conference, Montreal, Canada, 1991**
- (15) MORGAN, D.R. **Dry-Mix Silica Fume Shotcrete in Western Canada. Concrete International, p.24-32, jan., 1988**
- (16) MORGAN, D.R. **High Early Strength Blended-Cement Wet-mix Shotcrete, p.35-39. Concrete International, May, 1991.**

- (17) MORGAN, D.R.; WOLSIEFER, J. **Wet-mix silica Fume Shotcrete: Effect of silica fume form.** Fourth CANMET-ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istabul, Turkey, May 3-8. 1992.
- (18) MURATA, J. **Studies on the permeability of concrete,** Bull. RILEM, Mat.Const., Essais Rech., número 29, Dez.1965, p.47.
- (19) OSTERREICHISCHER BETONVEREIN. **Guidelines on Shotcrete - Part 1: Application** Austrian concrete Society, January 1990. 35pp.
- (20) PALERMO, G. **Concreto Projetado. A construção São Paulo,** São Paulo, números 2080 e 2081, p.39-42, 1987.
- (21) PALERMO, G. **Concreto Projetado- Contribuição para limites de especificações.** In: Seminário do Instituto Brasileiro do Concreto. IBRACON, julho. 1987.
- (22) PALERMO, G. **Durabilidade do Concreto Projetado.** In: Primeiro Encontro Técnico do Comitê Brasileiro de Túneis, 1992. pp 23-64.
- (23) PALERMO, G. **Contradições dos Parâmetros de Avaliação da Durabilidade de Concreto.** Seminário realizado na Cia. do Metropolitano de São Paulo sobre Atualização sobre Cimentos Brasileiros, São Paulo, abril 1992.
- (24) PALERMO, G. **Geometria do Concreto Durável.** *Revista Técnica*, 5, p.33-38, 1993.
- (25) PALERMO, G.; ROSSETTO, C. M. **Hormigón proyectado como estructura definitiva en túneles en suelos pelo método NATM.** II Congresso Internacional sobre Cemento y Hormigón - II Salón Internacional de Arquitectura e Ingeniería, Cuba, 1994
- (26) PALERMO, G.; SARDINHA, V.L.A.; COUTINHO, P.T. **Shotcrete Durability.** Shotcrete Underground, International Tunnelling Association-ITA, Salszburg, spring, 1994
- (27) PALERMO, G. **Durabilidade e Estanqueidade.** *Revista Técnica*, 18, p.32-36, set/out, 1995.
- (28) POWERS, T.C. **Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste e Limitaciones del Criterio Reglamentario Clásico para la Durabilidad de las Estructuras. Posibilidades de Mejora.** Publicação pela revista Portland Cement Association, Bull. 94, 1958.
- (29) POWERS, T.C. **The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete.** Publicação pela Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Bull. 90, July 1958.

- (30) RABCEWICZ, L.V. The new Tunnelling Method. **Water Power**, Julh/Julh/Agosto, 1969.
- (31) READING, T. **Recommended Practice for Shotcreting**. ACI, Detroit, 1966
- (32) SIMONDI, S.; NEGRO Jr., A.; KUPERMAN, S.C. **Utilização de concreto projetado como revestimento definitivo de túnel escavado em solo**. In: Colóquio sobre Concreto em Fundações e Obras Subterrâneas. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 1982 49pp.
- (33) TERZAGHI, R.D. Concrete Deterioration due to Carbonic Acid. **Jornal of The Boston Society of Civil Engineers**, 26, 1949.
- (34) TORRENT, R.J. **Importancia de la Calidad del Recubrimiento para la Durabilidad de las Estructuras. Su evaluacion "in situ"**. Seminário Técnico de Concreto de Alto Desempenho e Durabilidade do Concreto, CB-18 da ABNT e CIMINAS SA, outubro, 1992.
- (35) TOUGH, S.G. **Aspectos Econômicos da Abertura de Túneis**, Simpósio de Tecnologia Britânica no Instituto de Engenharia, Rio de Janeiro, novembro 1970.