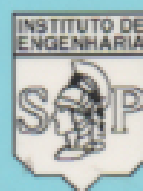


**3º SIMPÓSIO
SOBRE
TÚNEIS
URBANOS**



TURB 99



São Paulo, 18 e 19 de outubro de 1999

SEIS CASOS DE TÚNEIS URBANOS COM REVESTIMENTO EM CONCRETO PROJETADO ARMADO COM FIBRAS DE AÇO



Prof. Alberto Henriques Teixeira, Consultor A. H. Teixeira Consultoria e Projetos S/C Ltda.

RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo da evolução do emprego de concreto projetado em obras subterrâneas até a utilização do concreto projetado armado com fibras de aço. São apresentadas as propriedades deste material e a sua utilização em seis túneis urbanos executados em São Paulo. É apresentada uma metodologia que está sendo empregada no controle de qualidade do concreto projetado armado com fibras de aço.

1. INTRODUÇÃO

Na execução de túneis escavados em solo é fundamental para a estabilidade das paredes e da abóbada que o tempo decorrido entre a escavação e a aplicação do revestimento primário seja o menor possível.

A técnica usual de colocação de cambotas metálicas e/ou de telas soldadas requer um período de tempo que pode prejudicar as condições de estabilidade do maciço envolvente à escavação.

Com a introdução da técnica de concreto projetado armado com fibras de aço aquele período de tempo pode ser reduzido drasticamente, uma vez que a

aplicação do concreto projetado pode ser feita imediatamente após a escavação e permitindo ainda plena liberdade de serem estabelecidos comprimentos de passos de avanço variáveis em harmonia com as condições de estabilidade do maciço escavado. Esta vantagem não ocorre na técnica do uso de cambotas e no uso de tela soldada, quando o passo de avanço fica predeterminado por um espaçamento fixado no projeto ou por um submúltiplo da largura do painel da tela.

O emprego do concreto projetado armado com fibras de aço permite um produto acabado mais homogêneo o

que não ocorre quando da utilização de cambotas e de tela soldada pois, em ambos os casos, resulta o efeito de sombra que facilita no futuro a corrosão do aço.

Nas obras dos túneis a serem relatados obteve-se, outrossim, uma grande redução dos prazos de execução.

2. O CONCRETO PROJETADO

Denomina-se argamassa projetada ("gunita") e concreto projetado ("shotcrete") quando esses materiais são transportados e projetados pneumaticamente sob alta velocidade sobre uma superfície. Por volta de 1910 foi introduzida nos EUA a argamassa (cimento + areia + água) projetada, denominada de "gunita", utilizada principalmente para a proteção superficial de taludes em solo ou rocha e para revestimento de canais hidráulicos. Por volta de 1950 iniciou-se o emprego de concreto projetado (cimento + areia + agregado fino + água).

A técnica da argamassa projetada foi introduzida no Brasil, por volta de 1948, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, para recuperação estrutural, conforme descrito por Molinari (1948). Na mesma época a empresa Geotécnica S.A importou equipamento de "cement gun-gunita" para execução de revestimento de canal com argamassa projetada. As primeiras aplicações de concreto projetado no Brasil ocorreram em 1970 na execução dos túneis da Rodovia dos Imigrantes.

Desde 1981, quando da introdução no Brasil do sistema de projeto e de execução de túneis conhecido por N.A.T.M ("New Austrian Tunnelling Method"), o concreto projetado vem sendo largamente empregado na formação do revestimento de estruturas de obras subterrâneas, paralelamente às inovações introduzidas nos equipamentos de projeção e na tecnologia dos materiais utilizados.

A aplicação do concreto projetado é feita por três processos, a saber:

- a) Via úmida, quando todos os materiais (cimento, areia, pedrisco, água e aditivos plastificantes) são pré-misturados e transportados pneumaticamente até o bico de injeção, onde é acrescentado aditivo acelerador de pega.
- b) Via seca, quando a água é injetada sob pressão junto ao bico de injeção.
- c) Via semi-úmida, que é uma variante do processo de via seca, quando a água é injetada alguns metros antes do bico injetor.

Os processos apresentam vantagens e desvantagens quando comparados entre si. Resumidamente, os principais tópicos são os seguintes:

- a) Via úmida: É mais difícil obter alta resistência pelo fato da relação água/cimento ser mais elevada para obtenção de maior fluidez no transporte da mistura, resultando um teor de água superior àquele necessário para hidratação do cimento. Outrossim, obtêm-se um produto final mais ho-

mogêneo, não ocorrendo poeira durante a aplicação.

- b) Via seca: Produz grande quantidade de poeira no ambiente, porém obtêm-se uma maior resistência do concreto projetado face a relação água/cimento ser menor. Outrossim é obtido um produto final menos homogêneo.

Mais pormenores sobre as vantagens e desvantagens inerentes aos processos de aplicação veja-se, por exemplo, Figueiredo & Helene (1993), Silva (1997) e ASCE (1995), onde são discutidos os fatores que controlam a resistência e a qualidade do produto final e os procedimentos empregados para redução das perdas por reflexão. Este tema é de grande importância no caso de túneis quando da aplicação do concreto projetado na abóbada o qual, se mal aplicado, pode alcançar perdas por reflexão de 50% ou mais.

Os últimos avanços tecnológicos do concreto projetado são os produtos adicionados ao mesmo, a saber:- polímeros, sílica ativa e fibras (de aço, de vidro e materiais sintéticos), com a finalidade de aumento de resistência, melhoria do comportamento tensão x deformação e de seu desempenho.

3. O CONCRETO PROJETADO ARMADO COM FIBRAS DE AÇO (CPAF)

O emprego de fibras de aço no concreto projetado tem tido um grande

desenvolvimento desde 1960 e tem por maior finalidade transformar o concreto, que é um material frível no trabalho à tração na flexão (ruína brusca após o início da fissuração a qual ocorre a deformações de flexão mínimas), em um material dúctil capaz de suportar cargas mesmo após o início da fissuração. Em outras palavras, a adição de fibras de aço outorga ao concreto a propriedade de **tenacidade**, que é a capacidade de absorção de energia de deformação na flexão pós-fissuração.

Como uma seção de concreto armado convencional é extremamente heterogênea (grande concentração pontual de barras de aço de elevada resistência à tração distribuídas numa massa de reduzida resistência à tração), a substituição da armadura por fibras de aço conduz a seções estruturais mais uniformes, pois as fibras se distribuem homogeneamente na massa do concreto.

Na Figura 1 são comparados os diagramas carga x deflexão obtidos em ensaios de placas confeccionadas com concreto simples, armadas com tela soldada e com fibras de aço, conforme Morgan (1991). Nota-se que a deformação pós-fissuração da placa armada com fibras é mais gradual do que quando armada com tela soldada, a qual ocorre em degraus.

A tenacidade à tração na flexão do concreto armado com fibras é medida no ensaio dos três cutelos, que consiste em solicitar com uma carga concentra-

da uma viga prismática simplesmente apoiada conforme descrito no Anexo I. Na Figura 2 apresenta-se um resultado típico do ensaio de tenacidade à tração na flexão realizado em concreto armado com fibras de aço.

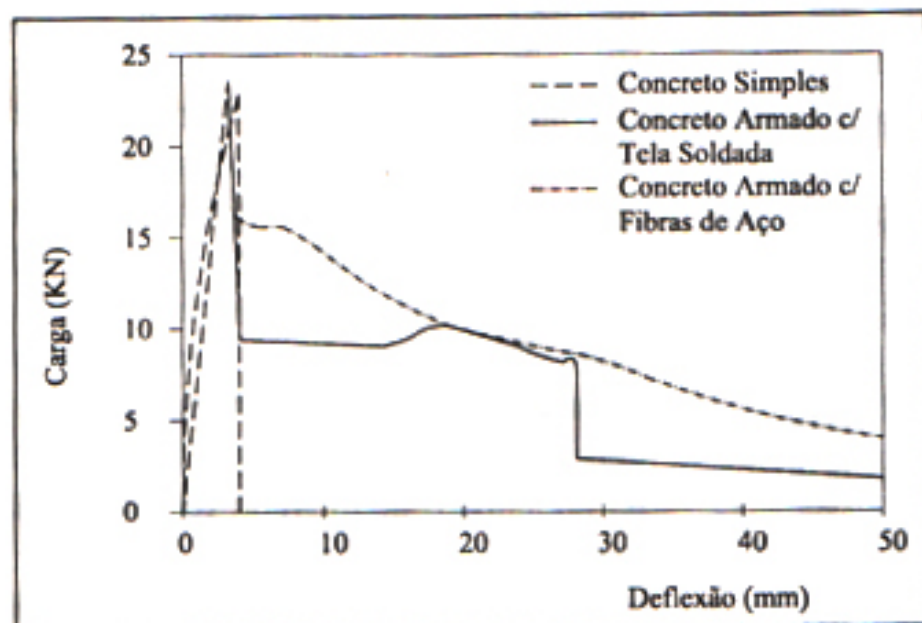


Figura 1 - Comparação do comportamento carga x deflexão de concreto simples, concreto armado com tela soldada e com fibras de aço, em placas - Morgan (1991)

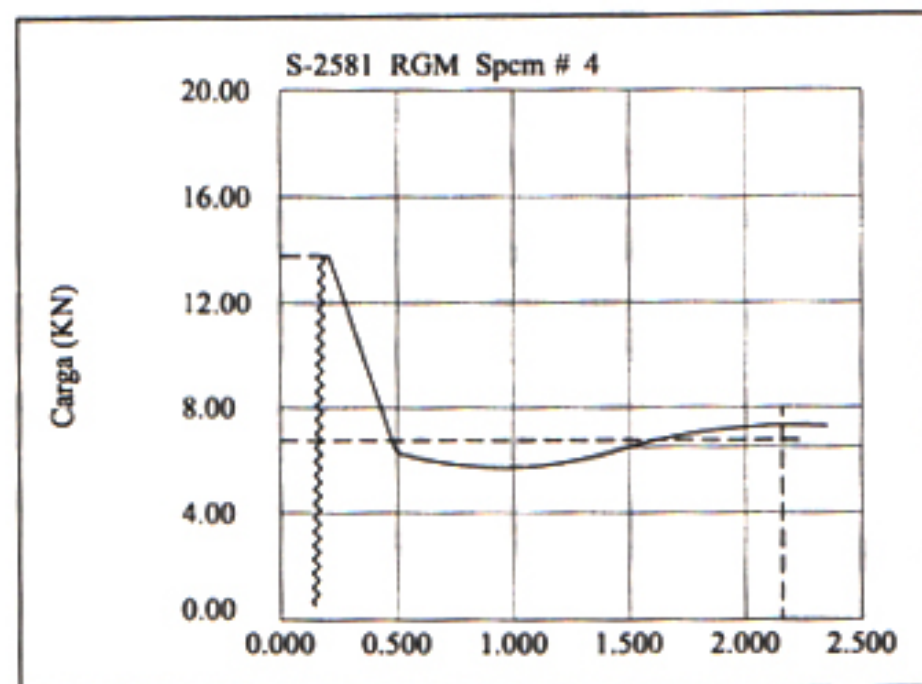


Figura 2 - Resultado típico de ensaio de tenacidade - viga 10cm x 10cm x 40cm - concreto projetado armado com fibras de aço - Alphageos (1991)

Segundo Vandewalle (1991) e ASCE (1995) as fibras de aço quando adicionadas ao concreto projetado conferem ao mesmo as seguintes vantagens:

- aumento da ductibilidade e da tenacidade (capacidade de absorção de energia);
- aumento da resistência à tração na flexão;
- aumento da resistência ao impacto e à fadiga;
- reduz a propagação de fissuras (redução da fissuração no estado plástico).

Para os teores usuais de fibras de aço (40 a 50 kgf/m³) empregados no concreto projetado para revestimento de túneis o aumento das resistências à compressão axial e à tração na flexão é módico, não ultrapassando cerca de 10%. A grande vantagem do emprego de fibras é dar ao concreto uma resistência contínua no comportamento pós-fissuração.

Com relação à durabilidade do concreto o uso de fibras é favorável

vel pois, sendo as fibras de pequeno comprimento, de reduzida seção transversal e estando distribuídas na seção, o mecanismo da corrosão não tem condições de se propagar como pode ocorrer ao longo das barras de aço de um concreto armado convencional. Neste caso, como a oxidação do aço é um fenômeno de elevada expansão volumétrica, gera-se uma pressão interna que fratura o concreto de recobrimento da armadura, e tornando o processo agressivo auto-acelerante. No caso das fibras, devido a sua pequena área da seção transversal, essa pressão de expansão é mínima, não afetando a resistência do concreto.

Na Figura 3 são apresentadas algumas das formas e dimensões das fibras empregadas no Brasil. As fibras utilizadas na armação do concreto projetado são caracterizadas pelo parâmetro denominado de fator de forma, que é a relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro equivalente da seção transversal. A ASTM (1990) recomenda que o aço empregado na fabricação das fibras te-

na uma resistência à tração mínima de 350 MPa.

Além do fator de forma e da resistência do aço, outros fatores importantes para o adequado desempenho do CPAF, são a forma geométrica e a quantidade de fibras empregada. Quanto maiores forem o fator de forma e o teor de fibras maior será a resistência à tração na flexão, todavia há um limite prático do teor de fibras pois com o seu aumento maior será a dificuldade de manuseio do concreto aplicado pneumaticamente.

O concreto projetado armado com fibras de aço vem tendo ampla utilização na Engenharia Civil como, por exemplo, no revestimento de túneis, no reparo, recuperação e reforço de estruturas, pavimentos industriais, rodoviários e aeroportuários de alta sollicitação e onde se exige elevada resistência a esforços dinâmicos (onde a fadiga é um aspecto importante), em peças de concreto pré-moldadas para diminuição da fissuração, revestimento de canais hidráulicos, revestimento e estabilização

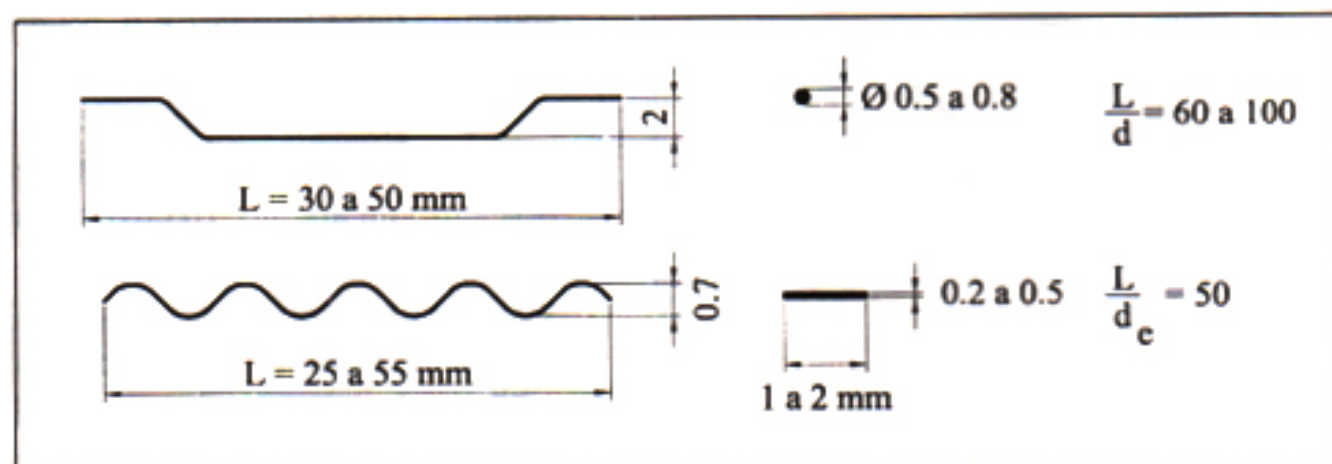


Figura 3 - Formas e dimensões usuais de fibras de aço

de taludes (formando a cortina no sistema de solo pregado), etc.

4. A UTILIZAÇÃO DE CONCRETO PROJETADO ARMADO COM FIBRAS DE AÇO EM REVESTIMENTOS DE TÚNEIS EM SOLO

A primeira obra onde foi aplicado o CPAF data de 1996, e é constituída por um túnel de pedestres situado sob a Rua das Perobas, em São Paulo, e cujas características são apresentadas na Figura 4. O projeto original da obra previa o emprego de concreto projetado armado com tela soldada e, com a alteração, o prazo de execução da obra foi reduzido de 40%.

Nas Figuras 5 e 6 são mostrados dois túneis de saneamento, de pequeno diâ-

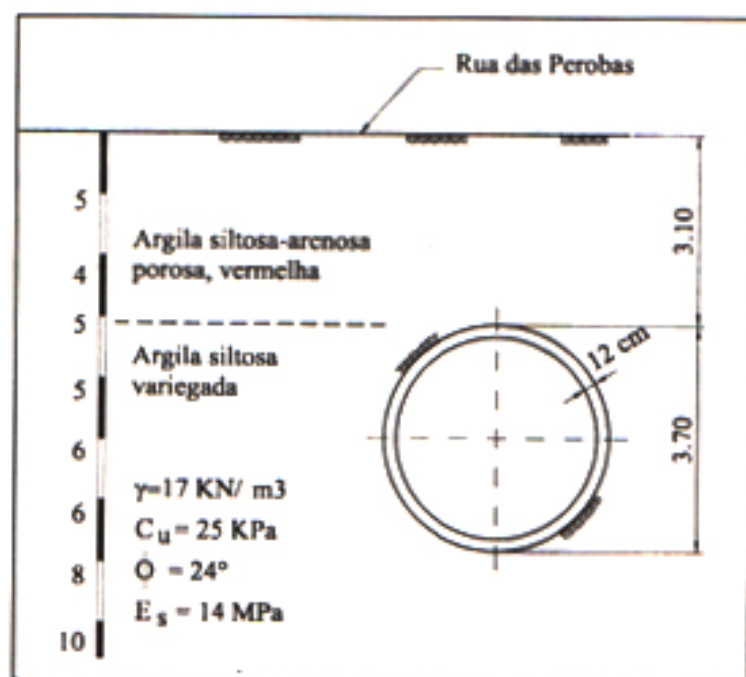


Figura 4 - Túnel para pedestres sob a Rua das Perobas

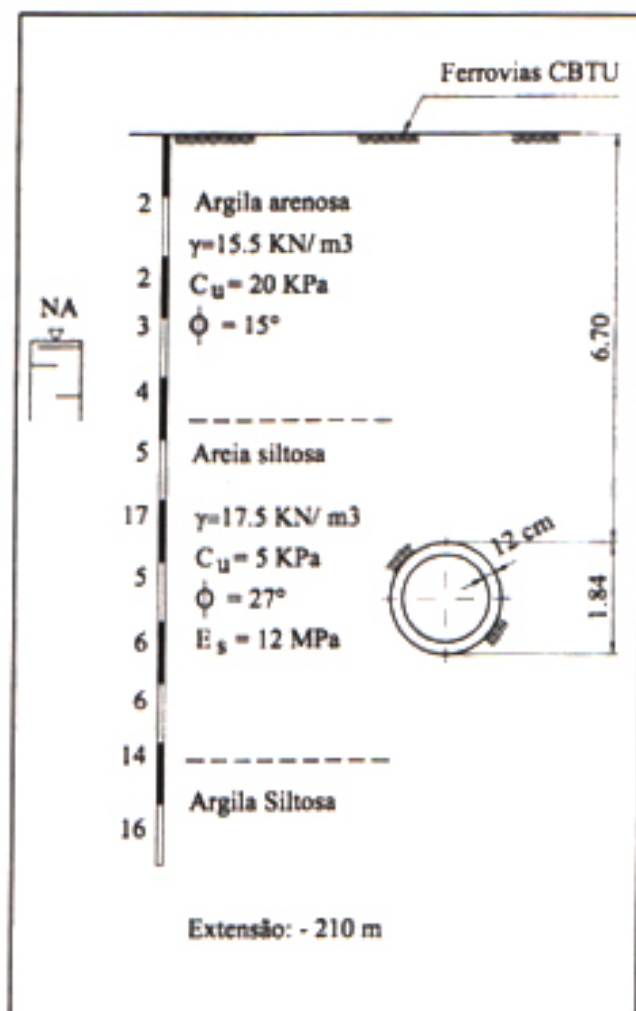


Figura 5 - Túnel de saneamento sob vias ferroviárias da CBTU

metro, nos quais se aprimorou a técnica de aplicação do CPAF. Com o aumento da confiabilidade do uso do CPAF foram executados, a seguir, dois túneis apresentados nas Figuras 7 e 8, escavados em condições muito críticas, ou seja, a passagem sob uma galeria de águas pluviais (com recobrimento de apenas 70 cm) e em argila orgânica submersa de baixíssima resistência ao cisalhamento, e o outro túnel distante de 1,50 m sob uma tubovia enterrada formada por oleodutos da PETROBRÁS, em São Bernardo do

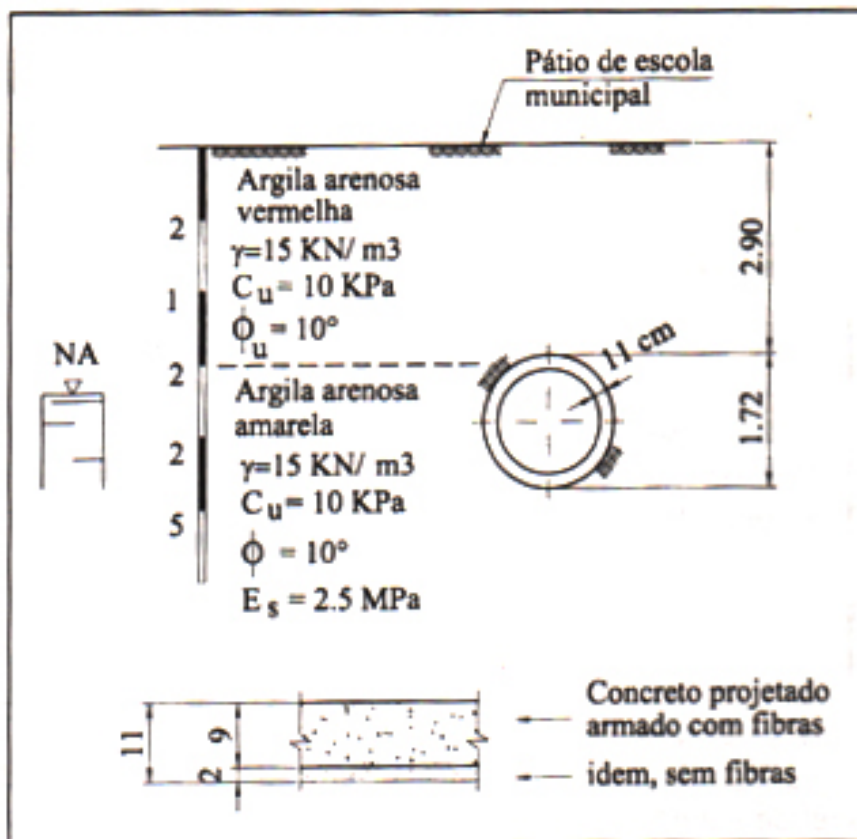


Figura 6 - Túnel de saneamento sob pátio de escola municipal

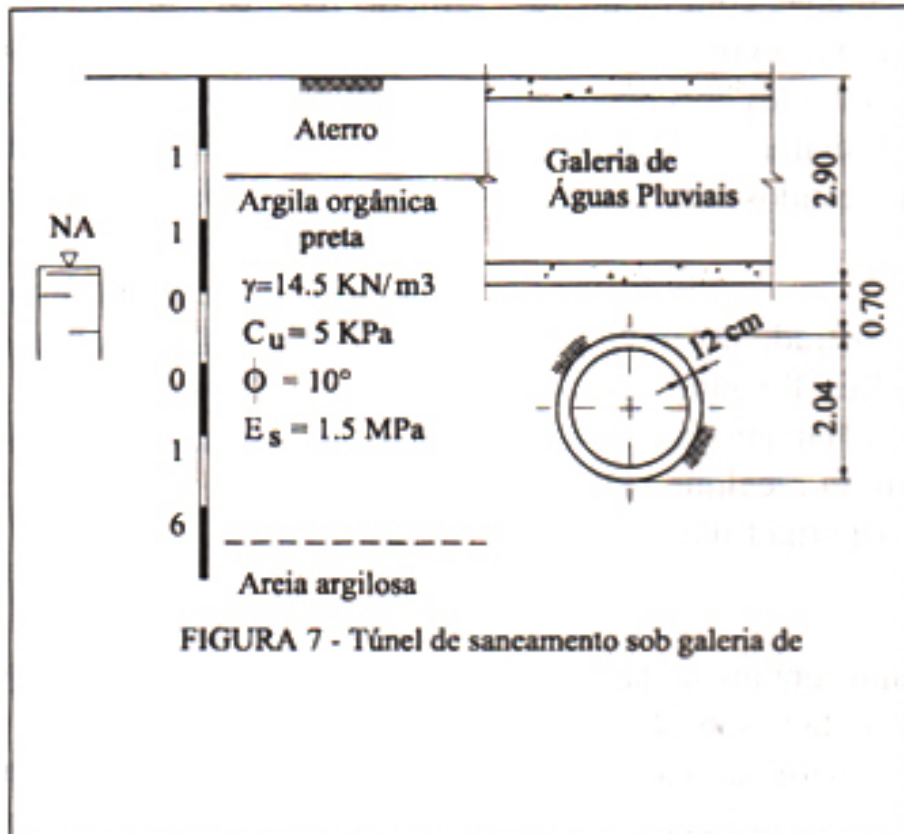


FIGURA 7 - Túnel de saneamento sob galeria de
Figura 7 - Túnel de saneamento sob galeria de águas pluviais - Av. José Fornary

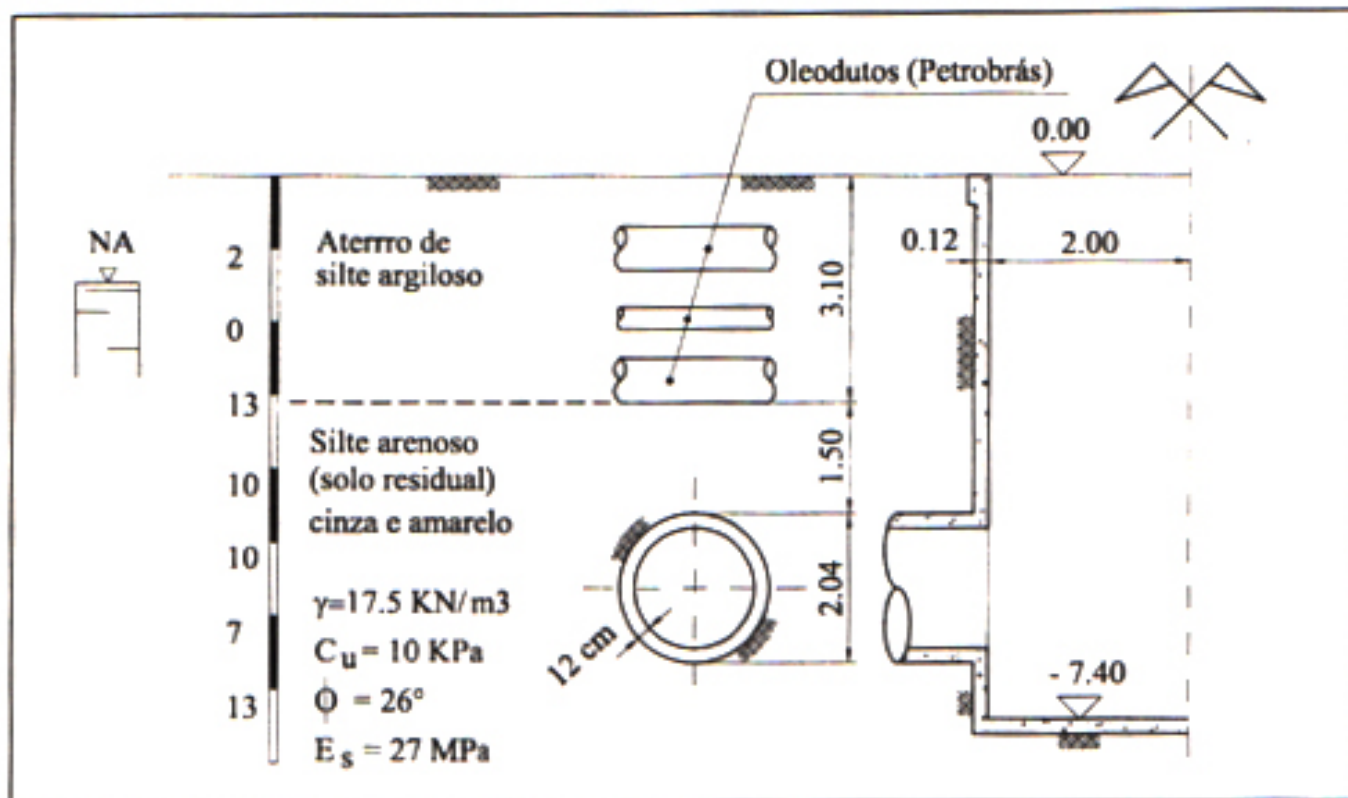


Figura 8 - Túnel de saneamento sob oleodutos da Petrobrás - Av. José Fornary

Campo. Em ambos os casos as travessias foram executadas com pleno sucesso, sendo que na segunda obra foram também executados dois poços de acesso, de 4 m de diâmetro e 7,40 m de profundidade, revestidos com 12 cm de CPAF.

Na Figura 9 é mostrado um túnel para pedestres sob a Rua Tavannes, em São Paulo, já com um diâmetro interno acabado de 5,10 m. O recalque máximo medido no leito de rua foi de cerca de 5 mm.

Na Figura 10 apresentam-se dados da obra de túnel executado sob o Rio Tietê e sob as avenidas marginais, para passagem da adutora Guaraú-Lapa, da SABESP. Apesar de ser o maciço formado por argila dura do Terciário da bacia

sedimentar de São Paulo, dotada de inúmeras fissuras (superfícies-espelho ou "slickensides"), com recobrimento de solo que chegou a 2,30 m e pressão hidrostática de 12,50 m, a obra foi terminada sem problemas. Na Figura 11 são apresentados resultados típicos da monitoração deste túnel feita em 15 seções, representada por medidas de convergência e nivelamentos de marcos internos instalados no revestimento.

5. CONTROLE DE QUALIDADE DO CPAF

Nas obras executadas acima mencionadas procedeu-se o controle de qualidade do concreto obedecendo as especificações constantes do Anexo I.

RUA TAVANNES

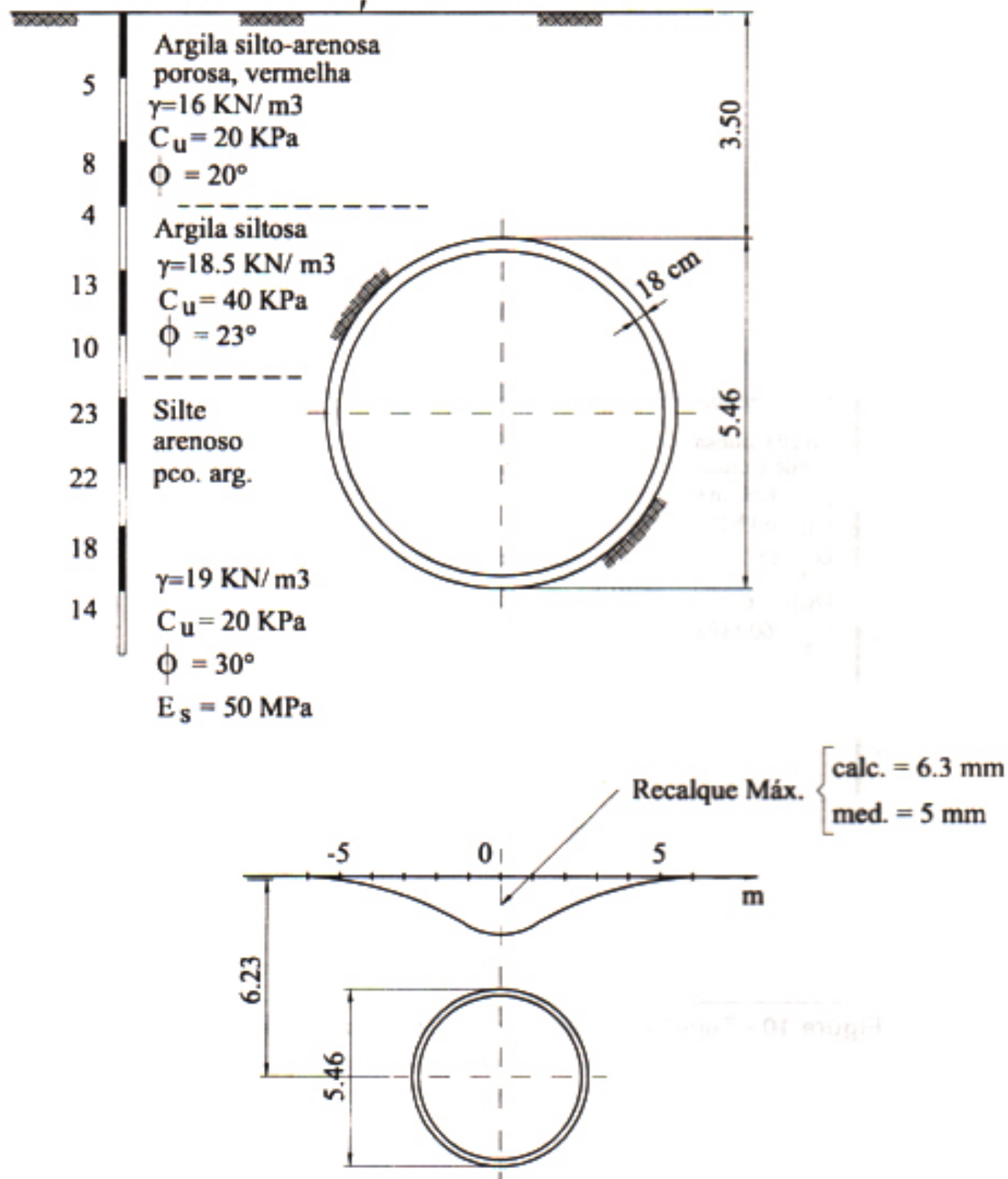


Figura 9 - Túnel para pedestres sob a Rua Tavannes - bacia de recalques

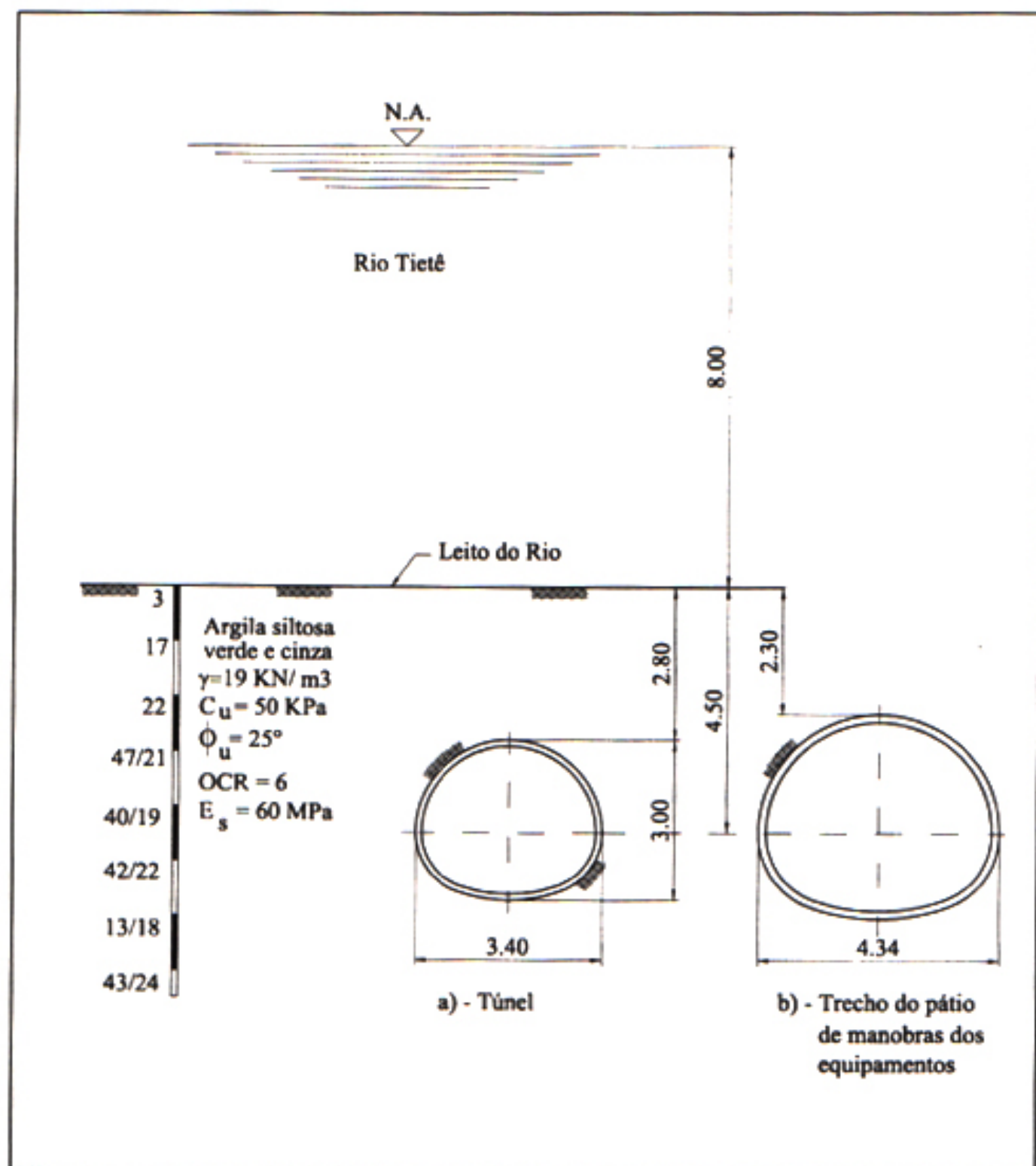


Figura 10 - Túnel sob o leito do Rio Tietê e Avenidas Marginais

RGM - TÚNEL SOB O RIO TIETÊ - LATINA - SABESP
 CONVERGÊNCIA EST. TOTAL SEÇÃO S4
 ADUTORA GUARAU - LAPA

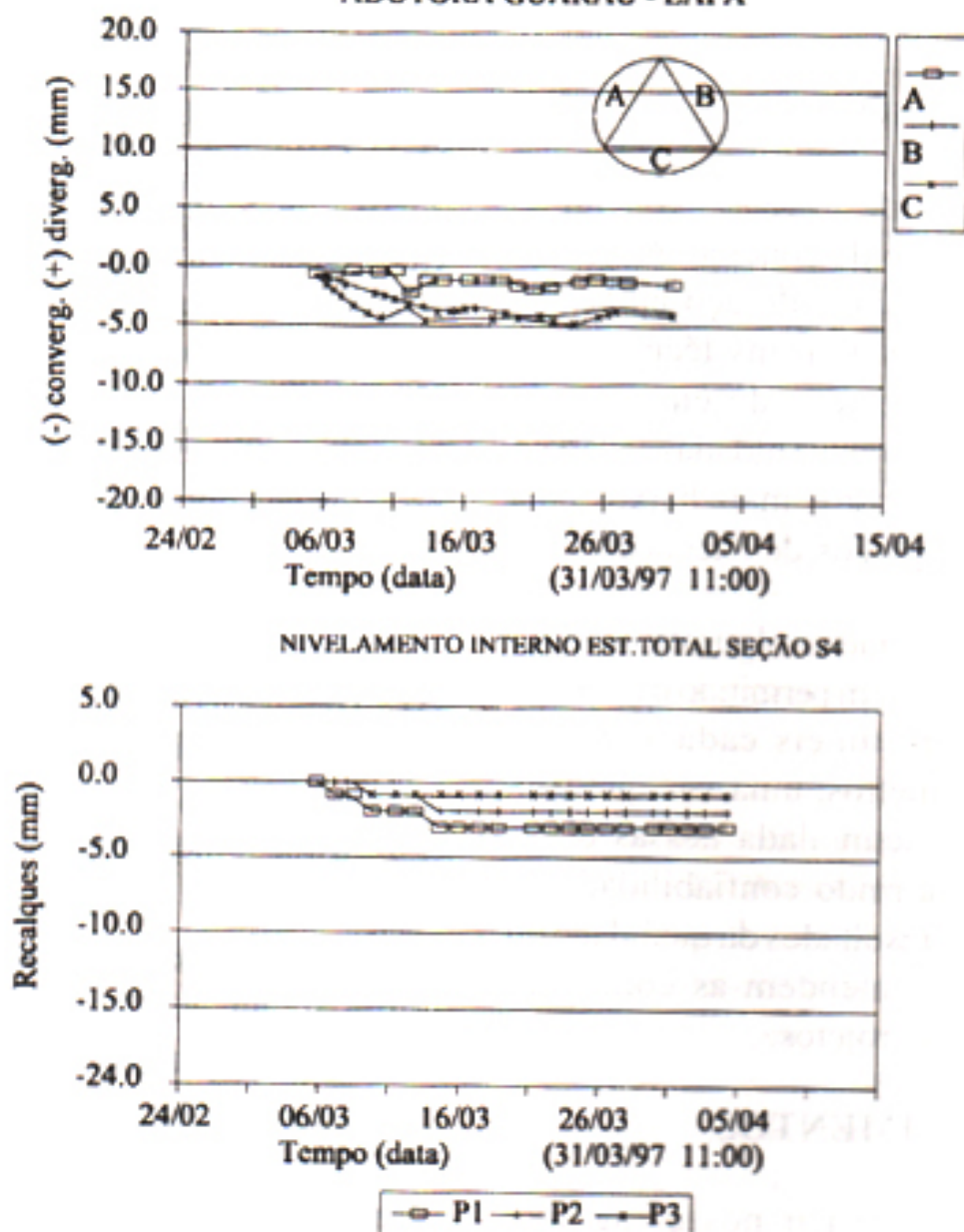


Figura 11 - Resultados típicos da monitoração do túnel sob o Rio Tietê - Latina (1997)

O consumo de cimento empregado se situa entre 400 e 500 kgf/m³ de concreto e o teor de fibras de aço entre 40 kgf e 50 kgf/m³, dependendo do tipo das fibras. A resistência à compressão axial, determinada em c.p. de 28 dias

de idade, deve ser no mínimo de 27 MPa, para obter-se uma resistência característica de 20 MPa. Com relação à resistência equivalente à tração na flexão obtida no ensaio de tenacidade especifica-se o valor de 1,5 MPa.

Na Tabela I são apresentados os resultados do controle de qualidade obtidos nas obras de túneis relatadas neste trabalho.

6. CONCLUSÕES

Pelos dizeres deste relato conclui-se que a utilização do concreto projetado armado com fibras de aço apresenta uma série de vantagens técnicas em relação aos métodos do emprego de cambotas e de telas soldadas, aliada a vantagem de custos mais baixos pela redução dos prazos de execução.

As obras executadas, algumas em condições difíceis, têm permitido o emprego do CPAF em túneis cada vez com maiores diâmetros, uma vez que pela experiência acumulada nessas obras vem-se adquirindo confiabilidade na obtenção de resultados da qualidade do concreto que atendem as condições impostas nos projetos.

AGRADECIMENTOS

Desejamos externar nossos agradecimentos aos técnicos e às empresas que

colaboraram de modos diferentes na evolução do emprego do CPAF, a saber: SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo; LPC - Latina Projetos Cívicos; ALPHAGEOS - Geologia, Geotecnia e Comércio Ltda; Geol. Cairbar Azzi Pitta e Eng^o Alberto Zirlis, da SOLOTRAT Engenharia Geotécnica Ltda; Eng^{os} Andrea Menghi e Abílio Marum Tabet Filho, da RGM Engenharia e Construções Ltda; e nosso colaborador Eng^o Alberto Alexandre Henriques Teixeira, responsável pelos projetos das obras relatadas.

BIBLIOGRAFIA

- ALPHAGEOS (1997) - Relatório n^o AGR/2581 - Relatório de Estudo de Desempenho de Concreto Projetado Reforçado com Fibras de Aço.
- A.S.C.E (1995) - American Society of Civil Engineers - Standard Practice for Shotcrete - ASCE Press.
- ASTM (1990) - American Society for Testing and Materials Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete - Designation A 820 - 90.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de controle de qualidade do concreto projetado armado com fibras de aço

OBRA	COMPRESSÃO AXIAL		TRAÇÃO NA FLEXÃO			
	f_{c28} (MPa)	E (MPa)	f_o (MPa)	f_u (MPa)	T_b (MPa)	f_e (MPa)
RUA PEROBAS	43.1	19.5	-	5.3	-	
RUA TAVANNES	42.0	19.6	-	6.0	9.0	1.5
SOB A CBTU	28.2	-	-	5.2	11.9	1.7
RIO TIETÉ	-	-	4.6	4.6	10.2	1.6

FIGUEIREDO, A. & HELENE, P. (1993) - Concreto Projetado:- O controle do Processo de Projeção - Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - BT/PCC/92.

J.S.C.E (1984)- The Japan Society of Civil Engineers - Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Reinforced Concrete - SF.4

LPC LATINA (1997) - Relatório RGM-01-II - Acompanhamento Técnico de Execução das Obras da Adutora Guaraú-Lapa.

MOLINARI, G (1948)- Restauração de Concreto pelo Processo "Cement-gun" - Revista Engenharia nº 66 - Fev. 1948

MORGAN, D.R. (1991)- Steel Fiber Reinforced Shotcrete for Support of Underground Openings in Canada - Concrete International - November 1991.

SHEIKAN ANCORJET (1994) - Steel Jet Fibras Metálicas para Reforço de Concreto e Concreto Projetado Tipo I ASTM A 820

SILVA, P.F.A (1997) - Concreto Projetado para Túneis - Editora Pini.

VANDEWALLE, M. (1991) - Tunneling the World - Dramix - N.V. Bekaert S.A.

ANEXO I

CONTROLE DA QUALIDADE DO CONCRETO PROJETADO ARMADO COM FIBRAS DE AÇO

1 - Moldagem, no canteiro de obras, de placas de dimensões 60 cm x 60 cm,

com bordas inclinadas de 45°, e 10 cm de espessura.

2 - Corte, no laboratório, de corpos de prova:-

- a) de forma cilíndrica, diâmetro de 7,5 cm e 10 cm de altura
- b) de vigas prismáticas, seção transversal de 10 cm x 10 cm, e comprimento de 40 cm.

3 - Ensaios dos corpos de prova:-

- a) Ensaio à compressão axial para determinação da resistência à compressão simples (ou axial) f_{cj} a 1, 7, 15 e 28 dias da data de moldagem.
- b) Ensaio de tenacidade (ou ensaio dos três cutelos, com cargas controladas após a fissuração, e medidas da deflexão da viga prismática). Vide Figura 12. A ruptura da viga ocorre na seção central do c.p. onde o momento fletor é máximo e constante e a força cortante é nula. Convencionase chamar de resistência à tração na flexão o valor da tensão máxima aplicando-se a fórmula da flexão simples normal:-

$$f_{tf} = \frac{M}{W} = F \frac{L-a}{4} \cdot \frac{1}{W} = \frac{FL}{bh^2} \quad 1$$

onde, habitualmente:-

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{3} L & L &= 30cm \\ b &= h = 10cm \end{aligned} \quad 2$$

Na Figura 13 apresenta-se um diagrama força x deflexão característico ob-

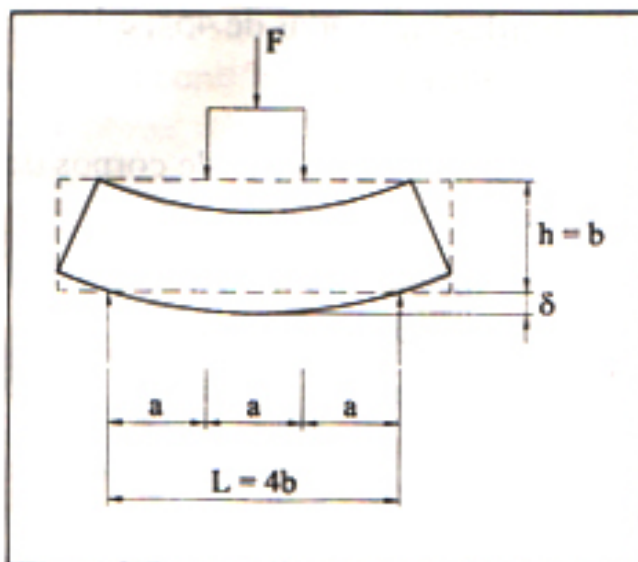


Figura 12 - Esquema do ensaio de tenacidade (Três cutelos)

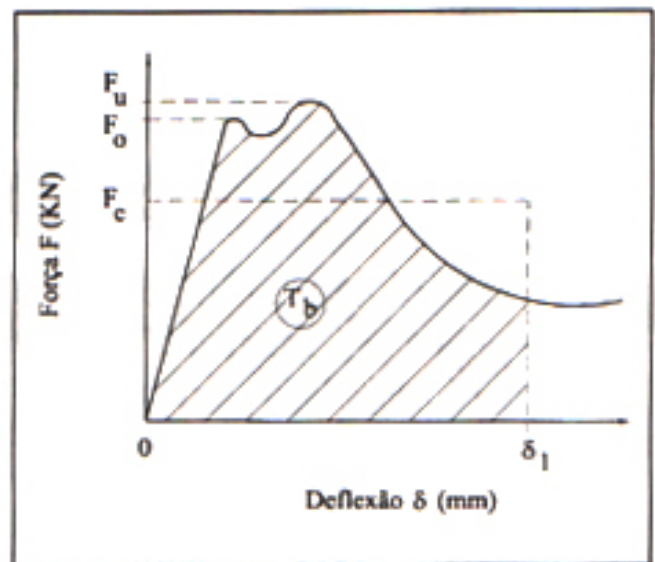


Figura 13 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de tenacidade

tido pela execução de ensaios.

A área T_b delimitada pelo diagrama força x deflexão mede a energia absorvida pelo concreto quando ele se deforma. Estabelecendo-se uma deflexão padrão (δ_1), resulta uma carga média (F_c) ao longo do ensaio de tenacidade, até essa flexão, de modo que:-

$$T_b = F_c \delta_1 \quad 3$$

Costuma-se nomear T_b de tenacidade do concreto armado com fibras de aço. A norma japonesa SF.4 (The Japan Society of Civil Engineers - JSCE - SF.4 - 1984), que vem sendo seguida em nosso meio técnico, estabelece que, sendo $L = 30$ cm,

$$\delta_1 = \frac{L}{150} = 2mm \quad 4$$

4 - Determinações (conforme o diagrama força x deflexão da Figura 13):-

a) Resistência à tração na flexão correspondente a abertura da 1ª fissura.

$$f_o = \frac{F_o L}{bh^2} \quad 5$$

b) Resistência máxima (ou última) à tração na flexão, ou módulo de rutura.

$$f_o = \frac{F_o L}{bh^2} \quad 6$$

Habitualmente nos ensaios tem-se $F_o \equiv F_u$

c) Determinação da tenacidade T_b (área do diagrama carga x deflexão até a deflexão de 2 mm)

d) Resistência equivalente à tração na flexão (ou fator de tenacidade), ou tensão de deflexão equivalente (ou convencional)

$$f_e = \frac{F_e L}{bh^2} = \frac{T_b}{\delta_1} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad 7$$