

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SEGUNDO O MÉTODO BASEADO NAS ANÁLISES DAS DEFORMAÇÕES CONTROLADAS NAS ROCHAS E NOS SOLOS

Prof. Eng. Pietro Lunardi

Tradução: Eng. Marcelo Pucci
Eng. Paolo Mosiici
1995

Publicação Original: "Progetto e Costruzione Di Gallerie Secondo il Metodo Basato Sull'Analisi Delle Deformazioni Controllate Nelle Rocce e Nei Suoli", publicado na revista *Quarry and Construction*, Marzo/94

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SEGUNDO O MÉTODO BASEADO NAS ANÁLISES DAS DEFORMAÇÕES CONTROLADAS NAS ROCHAS E NOS SOLOS*

Prof. Ing. Pietro Lunardi
Universidade de Parma, Itália
Rocksoil S. p. A., Milão, Itália

Primeira Parte

PRÉ-SUSTENTAÇÃO E PRÉ-CONTENÇÃO

Premissa

É sabido o modo como, durante a realização de um túnel, as tensões pré-existentes no maciço, uma vez desviadas pela abertura da cavidade, se canalizam ao longo do seu contorno, determinando zonas super solicitadas nas paredes da escavação. A canalização desse fluxo de tensões no contorno de cavidade é definida como “efeito arco” e é exatamente devido ao desencadeamento desse fenômeno que é possível criar “cavidades” no subsolo com garantia de preservação e durabilidade no tempo.

O “efeito arco” pode ser produzido de acordo com a magnitude dos estados tensionais pré-existentes no maciço e com as características de resistência e deformabilidade do mesmo, dos seguintes modos (figura 1):

- 1) nas proximidades do perfil da escavação;
- 2) longe do perfil de escavação;
- 3) não acontecer.

O primeiro caso (1) ocorre quando o solo, no contorno da escavação, suporta bem o fluxo das tensões desviadas, respondendo elasticamente em termos de resistência e deformabilidade.

O segundo caso (2) ocorre quando o solo no contorno da escavação, não estando em condição de suportar o fluxo das tensões desviadas, responde inelasticamente, plasticando-se e deformando-se proporcionalmente ao volume de solo envolvido pelo fenômeno de plastificação. Este último - que inclusive provoca aumento do volume do solo envolvido - provoca ao se propagar radialmente, o desvio da canalização das tensões para dentro do maciço, até que o estado triaxial de tensões se torne compatível com as características de resistência do solo.

* Traduzido pelos Eng^{os} Marcelo Pucci (Consultor) e Paolo Mosiici (Novatecna) do original “Progetto e Costruzione Di Gallerie Secondo il Metodo Basato Sull’Analisi Delle Deformazioni Controllate Nelle Rocce e Nei Suoli”, publicado na revista *Quarry and Construction*, Marzo/94 (Primeira Parte).

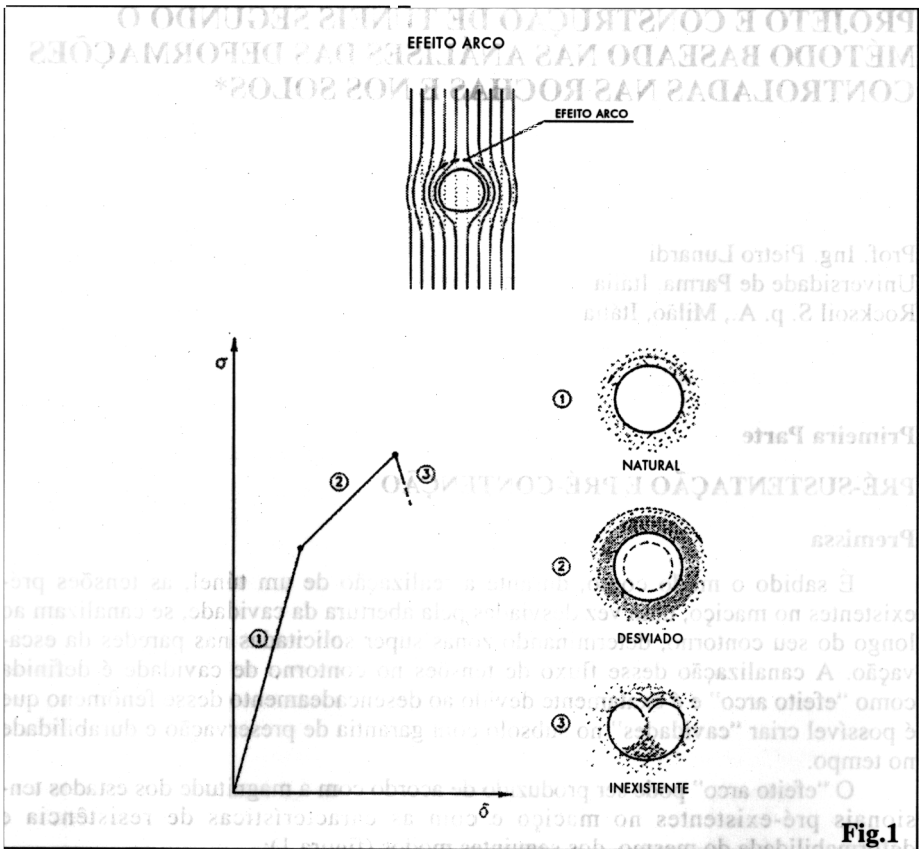


Fig.1

Nesta situação o “efeito arco” forma-se longe das paredes da escavação e o solo do contorno, já rompido, poderá colaborar na estática final da escavação apenas com a resistência residual dando lugar ao fenômeno de deformações de notáveis grandezas como convergências, etc.

O terceiro caso (3) ocorre quando o terreno no contorno da escavação - não sendo absolutamente capaz de suportar o fluxo das tensões desviadas - responde no campo de ruptura, provocando o colapso da cavidade.

Pode-se observar, da análise desses três casos, que:

- o efeito arco *por via natural*, produz-se apenas no primeiro caso;
- no segundo caso o efeito arco se produz por via natural apenas se o maciço for “ajudado” por meio de intervenções estabilizadoras;
- no terceiro caso o efeito arco, não podendo se produzir por via natural, deverá ser produzido *por via artificial*, intervindo-se adequadamente no próprio maciço antes de escavá-lo.

O projetista de túneis - cujo primeiro e mais importante objetivo deve ser o de analisar *se e como* o efeito arco poderá se desenvolver no ato de escavar o túnel -

uma vez tendo compreendido que ajudar o maciço significa dispor de instrumentos para reconduzir o segundo e o terceiro caso para o primeiro, deve estabelecer definitivamente e de maneira inequívoca, se ele vai querer enfrentar o projeto (que não é outra coisa se não a definição da ajuda que ele pretende dar ao maciço para controle do efeito arco) segundo a “filosofia de sustentar” ou a “filosofia de conter” a cavidade.

Se nós analisarmos o que se entende por sustentar, ou seja, pré-suporte, e por conter, ou seja, pré-contenção, aparecerá evidente qual deve ser o enfoque de projeto mais adequado para um projetista de túneis (figura 2).

Se o projetista resolver enfrentar a escavação com *intervenções de sustentação*, deverá estar convencido de que :

- sustentando o maciço ele produz uma ação passiva.
- esta posição significa aceitar a relaxação do maciço e que a reação em termos de deformação do mesmo possa evoluir de modo praticamente descontrolado, deixando que o efeito arco se afaste sem controle em relação ao contorno da escavação.
- operando desse modo, ele resolve o problema da estabilidade da cavidade com critérios trazidos da engenharia de mineração que, tendo objetivos diferentes da engenharia de túneis, obviamente não se preocupa em impedir a relaxação do maciço no contorno da cavidade; nem de reduzir ao mínimo os deslocamentos em relação ao perfil teórico da escavação; nem mesmo de salvaguardar a integridade das propriedades geomecânicas do maciço e muito menos garantir a manutenção da cavidade projetada a longo prazo.

Se, pelo contrário, o projetista decidir enfrentar a escavação com “intervenção de contenção”, ele deve estar ciente de que:

- contendo o maciço ele produz uma ação ativa.
- contendo o maciço ele controla sua relaxação e a conseqüente resposta em termos da deformação.

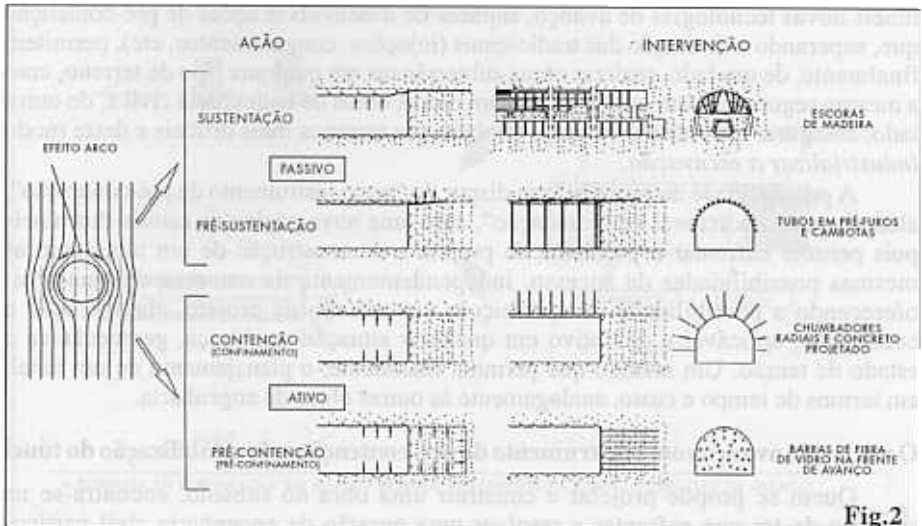


Fig.2

- conservando e melhorando as características do maciço o mesmo pode colaborar eficazmente com a estabilidade final da escavação: valoriza-se deste modo o maciço como material de construção, assegurando-se a formação do efeito arco não muito longe do perfil da cavidade.

- ele poderá recorrer a “intervenção de sustentação” somente em casos de emergência para limitar eventuais danos provenientes de um erro de projeto ou de construção.

Destas considerações conclui-se que se o projetista de túneis quiser projetar e executar corretamente a sua obra subterrânea, tomando portanto em consideração tão somente, e, exclusivamente, aquelas “ajudas” ao terreno (intervensões de consolidação) que produzem efeito arco, não terá outra escolha se não aquela da “filosofia de contenção”, excluindo de seu vocabulário a palavra “sustentar”, e todos os seus derivados como “sustentação” e “pré-sustentação”.

De fato, até o termo “pré-sustentação” com o qual nos referimos às ações produzidas avante da face de escavação (montante) para distinguí-las das sustentações a ré da face (jusante), que tem origem na tradição de mineração e nada mais é do que uma tradução do *“marcha vante” que em sua versão moderna é chamada de enfilagens*. Estas, como se sabe, mesmo se constituídas por elementos estruturais, apoiadas em cambotas instaladas depois da escavação e distribuídas ao longo de uma geratriz circular, *não são capazes de produzir efeito arco no avanço*, devido a falta de colaboração recíproca no sentido transversal. Tratando-se de projeto e construção de túneis, devemos então falar em *contenção*, um termo que se aplica melhor ao conceito de ação ativa, capaz de produzir e controlar o efeito arco no contorno da cavidade, como aquela teorizada por Kastner nos anos 50 e desenvolvida por Rabcewicz nos anos 60, com a introdução de novas tecnologias como o concreto projetado, as cambotas e os tirantes. Por consequência deve-se falar de *pré-contenção* para referir-se àquelas ações ativas que produzem *efeito arco por via natural e por via artificial a montante da face de escavação*.

A propósito disto, nestes últimos anos apareceram na área de execução de túneis novas tecnologias de avanço, capazes de desenvolver ações de pré-contenção que, superando a limitação das tradicionais (injeções, congelamentos, etc), permitem finalmente, de um lado, realizar obras subterrâneas em qualquer tipo de terreno, com a mesma segurança com que se enfrentam outras obras de engenharia civil e, de outro lado, assegurar um ritmo de avanço também nos terrenos mais difíceis e deste modo *industrializar a escavação*.

A possibilidade do projetista em dispor do “novo instrumento de pré-contenção”, além daquele tradicional de “contenção”, abre uma nova página na estória dos túneis pois permite enfrentar o problema de projeto e de construção de um túnel com as mesmas possibilidades de sucesso, independentemente da natureza dos maciços, oferecendo a possibilidade de aperfeiçoar um método de projeto, classificação e construção, aplicável e operativo em qualquer situação geológica, geomecânica e estado de tensão. Um método que permita, finalmente, o planejamento de um túnel, em termos de tempo e custo, analogamente às outras obras de engenharia.

O núcleo de avanço como instrumento de pré-contenção e de estabilização do túnel

Quem se propõe projetar e construir uma obra no subsolo, encontra-se na situação de ter que enfrentar e resolver uma questão de engenharia civil particu-

larmente complexa, sendo esta obra, em comparação com uma em superfície, muito menos pré-determinável em seus dados essenciais para a elaboração do projeto.

A construção de uma obra no subsolo, de fato, ocorre pela retirada de materiais de um meio, cujas características não são facilmente avaliáveis - estando já submetidos pela natureza a estado de tensões que as ações de escavação e de construção modificam de forma irreversível - dando início as *reações* onde a estabilidade da obra depende do seu controle. Assim sendo, quem se propõe projetar e construir uma obra no subsolo não pode se eximir dos seguintes conhecimentos (figura 3):

- do *meio* em que deve operar;
- da *ação* resultante executando a escavação;
- da *reação* esperada como efeito da escavação.

O *meio*, que na prática é o elemento básico de construção do projetista de túneis, é constituído de materiais extremamente anômalos se comparados com os tradicionais da engenharia civil: é descontínuo, não homogêneo e anisotrópico. Apresenta, *na superfície*, característica muito variada que depende exclusivamente da sua natureza intrínseca (sua condição natural) *condicionada pela geomorfologia da crosta terrestre*, enquanto que *em profundidade* apresenta característica mutável também em função do estado tensional que o solicita (consistência adquirida), determinando o seu comportamento na escavação.

A *ação* se manifesta com penetração da frente no interior do meio. É, portanto, um *fenômeno claramente dinâmico*: podemos imaginar o avanço de um túnel como um disco (a frente) que avança com uma certa *velocidade* para dentro do maciço, deixando atrás de si o vazio. Ele produz uma *perturbação no meio*, seja vertical como horizontalmente, o que altera o estado das tensões pré-existentes.

No interior da região perturbada o *campo de tensões pré-existentes*, que podemos representar como uma rede de linhas de fluxo, é desviado pela existência da parte

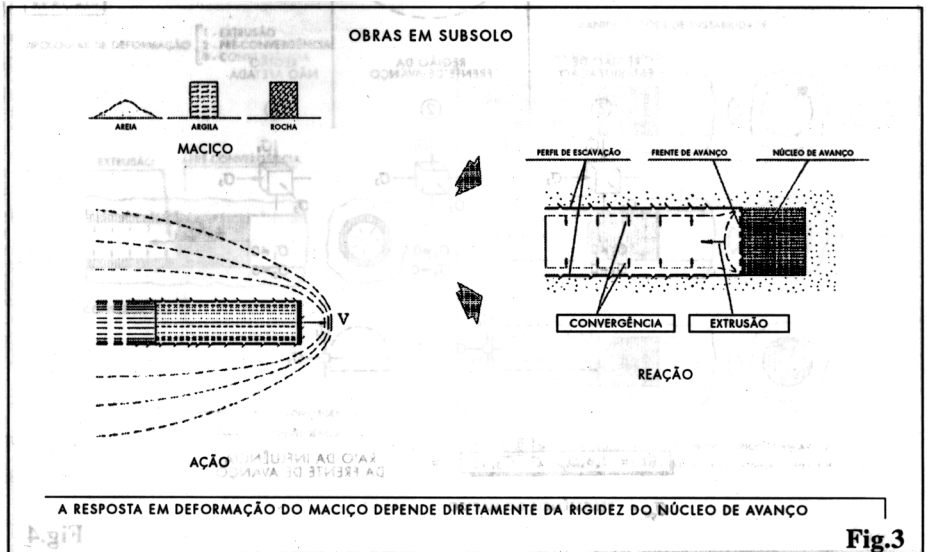
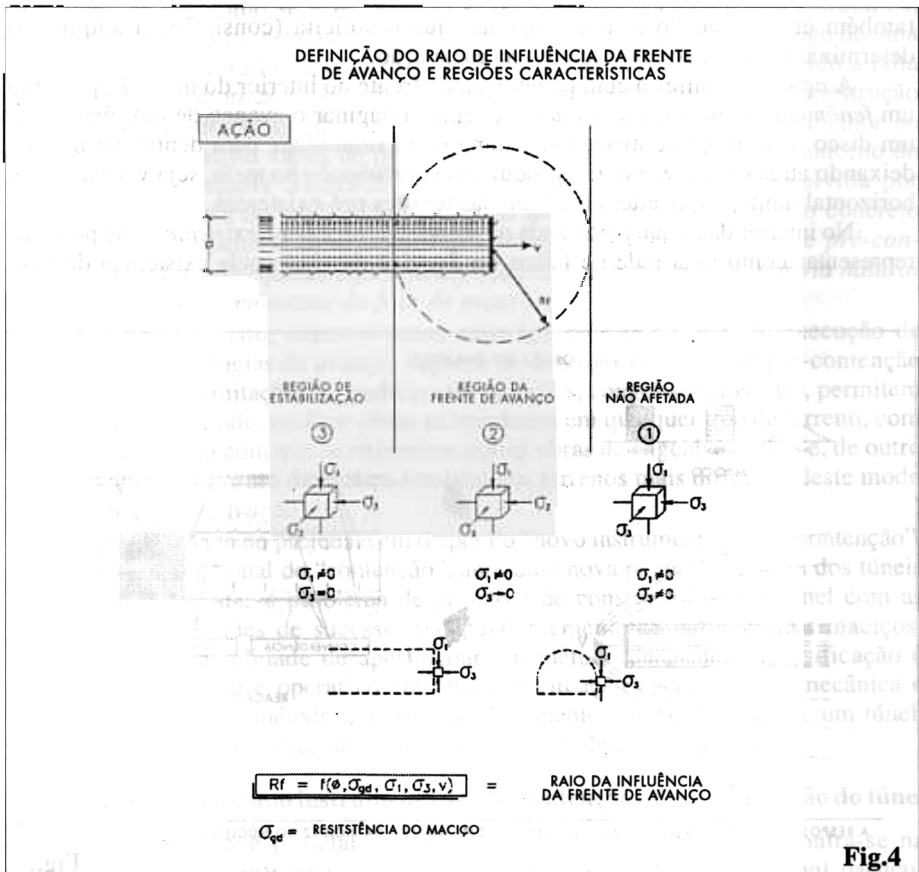


Fig.3

escavada (figura 1) e se concentra na proximidade da mesma, produzindo sobretensões. A grandeza destas sollicitações incrementais determina para cada tipo de maciço a amplitude da região perturbada (no interior dessa região o solo sofre uma perda das características geomecânicas com consequente aumento de volume) e, portanto, o comportamento da parte escavada, dependendo da resistência do maciço σ_{gd} .

A amplitude da zona perturbada nas proximidades da montante é definida pelo *raio de influência da montante de avanço* R_f (figura 4) que por sua vez define o espaço sobre o qual o projetista deve concentrar a sua atenção e dentro do qual ocorre a evolução de um estado de tensão triaxial para um biaxial plano (zona da montante de avanço ou de transição). Para a correta análise do túnel ele deve então utilizar-se de métodos de cálculo tridimensionais e não só planos.

A reação é uma resposta em termos de deformação do meio à ação da escavação. Ela é gerada a montante da face de escavação na região da zona perturbada, em consequência das sobretensões geradas no maciço no contorno da escavação, e depende da resistência do meio e da forma em que se realiza o avanço da montante (a ação).



A resposta em termos da deformação da face e da cavidade, dependendo da consistência adquirida do maciço e da ação exercida, se manifesta das seguintes formas (figura 5):

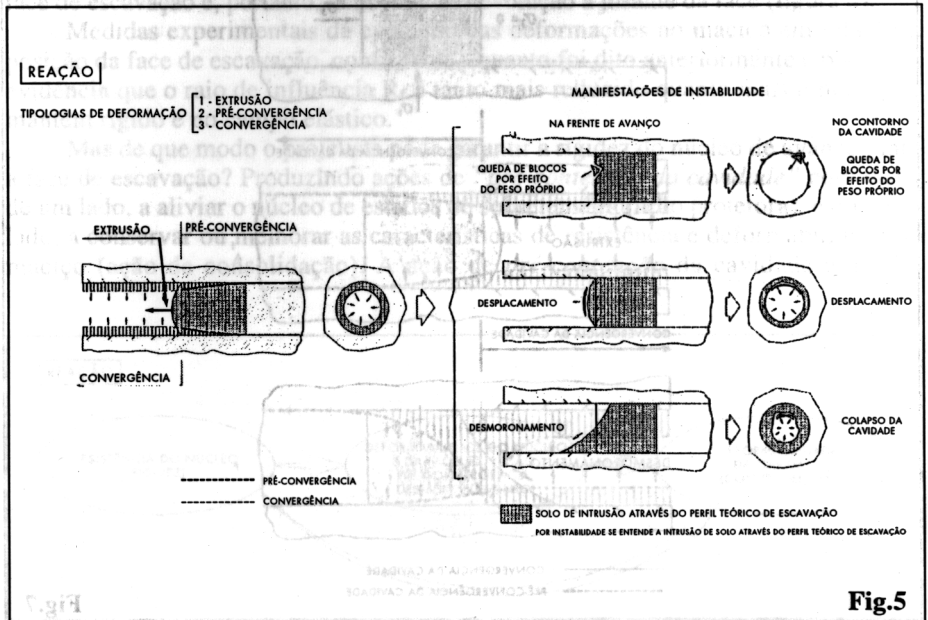
- a) extrusão da face;
- b) pré-convergência (entendido como convergência do perfil teórico a montante da face de escavação);
- c) convergência.

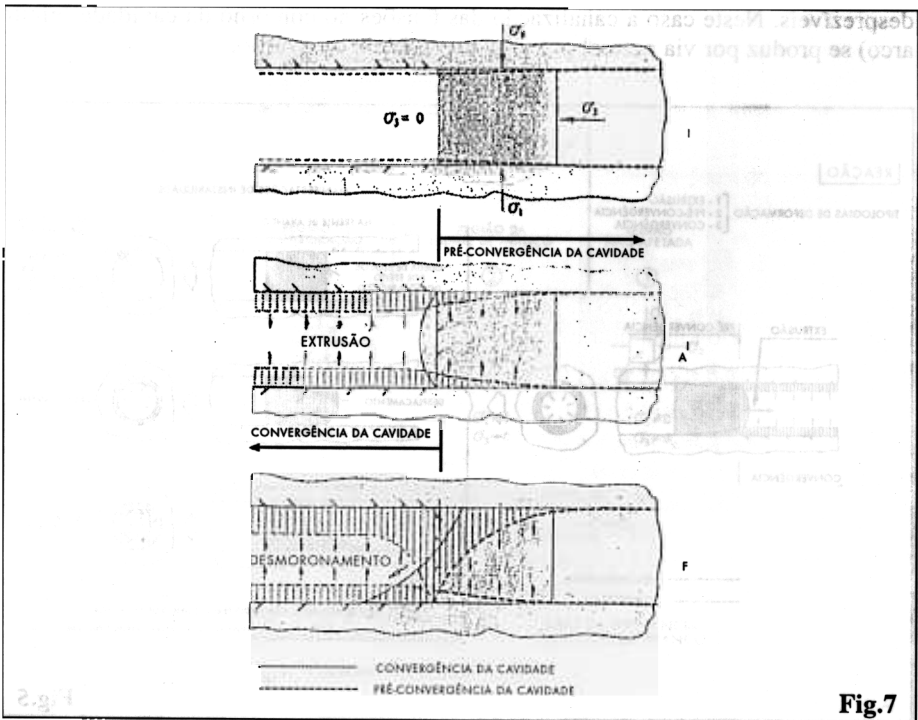
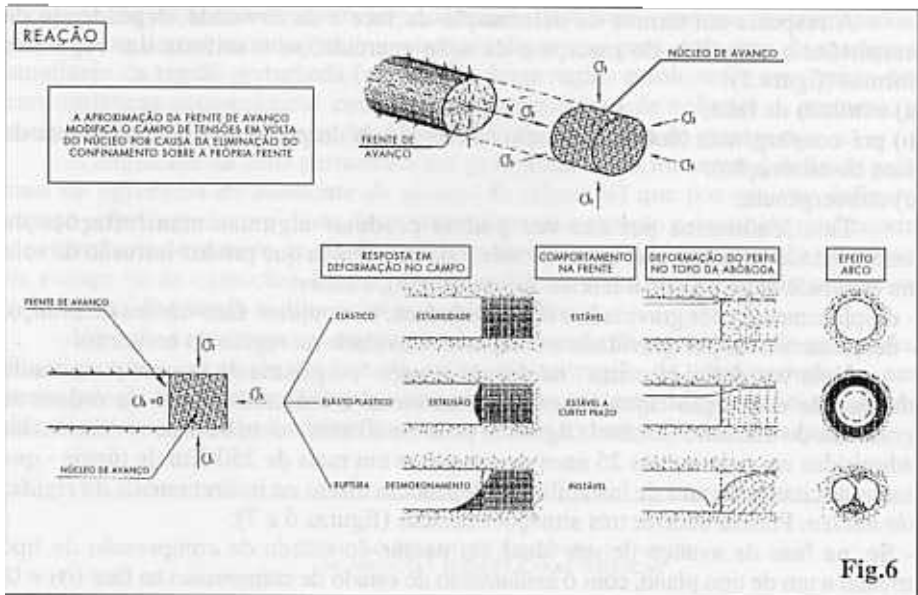
Tais fenômenos por sua vez podem produzir algumas manifestações de instabilidade (considera-se instabilidade toda ocorrência que produz intrusão de solo na cavidade além do perfil teórico de escavação), a saber:

- deslocamentos por gravidade e colapso da face, no conjunto face-núcleo de avanço;
- deslocamentos por gravidade e colapso da cavidade na região do contorno.

Uma vez definido como “núcleo de avanço”, o prisma de terreno a montante da face de escavação cujas dimensões transversal e longitudinal são da ordem de grandeza do diâmetro do túnel (figura 6) pode-se afirmar - com base nas experiências adquiridas em pelo menos 25 anos de pesquisas em mais de 250 Km de túneis - que todas as citadas formas de instabilidade dependem *direta ou indiretamente da rigidez do núcleo*. Podem ocorrer três situações básicas (figuras 6 e 7):

- Se, na fase de avanço de um túnel, ao passar do estado de compressão de tipo triaxial a um de tipo plano, com o anulamento do estado de compressão na face ($\sigma_3 = 0$) produz sobre o núcleo de avanço solicitações no campo elástico, a parede aberta (face de escavação) se mantém *estável* com deformações limitadas ou absolutamente desprezíveis. Neste caso a canalização das tensões no contorno da cavidade (efeito arco) se produz por via natural próxima ao perfil de escavação.





- Se, ao contrário, o anulamento do estado de compressão na face ($\sigma_3 = 0$) produz no núcleo de avanço solicitações no campo elasto-plástico, a reação também é importante e a parede aberta do núcleo (face de escavação) deformando-se elastoplasticamente para dentro da cavidade (extrusão), dá lugar a uma situação de *estabilidade a curto prazo*.

Tem início, assim, na ausência de intervenções, um fenômeno da plastificação que, ao se propagar longitudinalmente e radialmente a partir do contorno da cavidade, produz o deslocamento do “efeito arco” mais para dentro do maciço. Somente operando com intervenções de contenção e/ou de pré-contenção adequadas pode-se controlar tal afastamento.

- Se, por fim, o anulamento do estado de compressão na face ($\sigma_3 = 0$) produz no núcleo de avanço solicitações no campo de ruptura, a resposta em termos de deformação é inaceitável e ocorre uma situação de *instabilidade* do núcleo que torna impossível a formação do “efeito arco”. É o caso de maciços incoerentes ou fracos, em que o efeito arco não conseguindo se formar por via natural, deve ser produzido artificialmente.

A consequência disto é que as características de *resistência e deformabilidade do núcleo de avanço* tem um papel predominante no início e na evolução dos fenômenos de deformação da cavidade.

Pode-se, então, afirmar que tais fenômenos de deformação são consequências diretas dos fenômenos de deformação já produzidas a montante da face de escavação, e dependem das escolhas do projeto e de como controlar a resposta em termos de deformação e do método construtivo adotado (figura 7). Garantir a rigidez do núcleo de avanço significa, então, evitar os fenômenos de instabilidade da face e, conseqüentemente, controlar o surgimento da *resposta em termos de deformação* a montante da face de escavação e, portanto, também a sua evolução a jusante da face (figura 8).

Medidas experimentais da evolução das deformações no maciço em relação à posição da face de escavação, confirmam o quanto foi dito anteriormente e põem em evidência que o raio de influência R_f é tanto mais reduzido quanto mais o núcleo se mantém rígido e no campo elástico.

Mas de que modo o projetista pode garantir a rigidez do núcleo de avanço junto a face de escavação? Produzindo ações de “*pré-contenção da cavidade*” com vista, de um lado, a aliviar o núcleo de estados de sobretensões (ação protetora), e do outro lado, a conservar ou melhorar as características de resistência e deformabilidade do maciço (ação de consolidação). A ação de *pré-contenção* da cavidade é assim

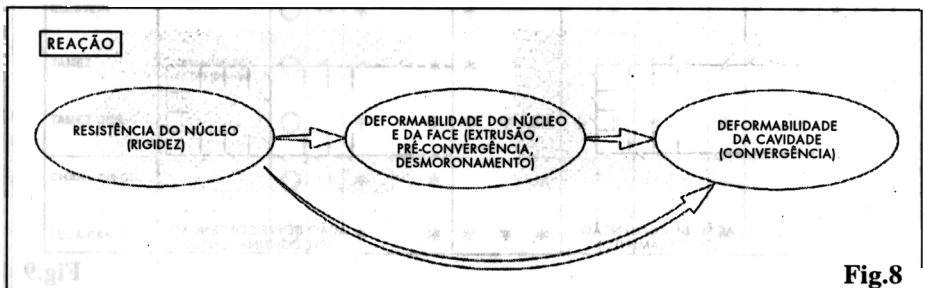


Fig.8

definida para distinguí-la da ação de simples *contenção* que atua no contorno da mesma, a jusante da face de escavação (figura 9).

A ação de pré-contenção, contrapondo-se ao surgimento da resposta em termos da deformação a montante da face, limita sua evolução a jusante da mesma, facilitando o seu controle. Portanto, torna-se necessária uma rigidez adequada a ser conferida ao núcleo de avanço a fim de manter o maciço incluso dentro do raio de influência da frente de escavação (R_f) em campo elástico, e de produzir o efeito arco mais próximo ao perfil da cavidade, com a consequente contenção dos fenômenos de deformação.

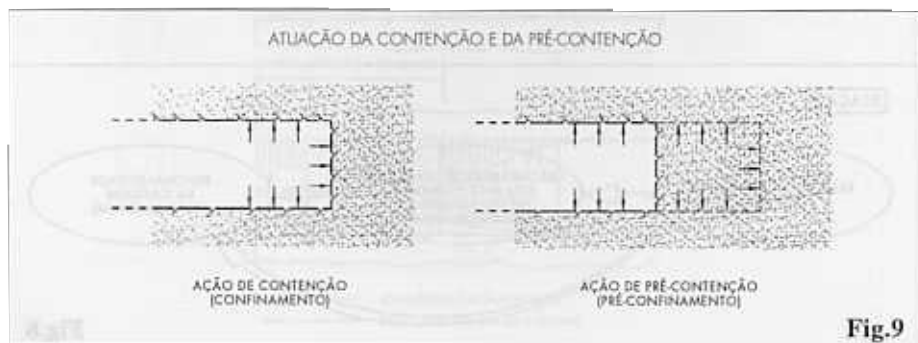
A importância de ter introduzido o conceito de ação de pré-contenção da cavidade no projeto e na construção dos túneis, reside no fato que se fornece ao projetista um novo instrumento que integra aqueles normalmente utilizados - ligados à ação da simples contenção - e que impõe um novo enfoque no cálculo. De fato, nos casos em que o estado de tensões induzidas com a abertura da cavidade - baseado nas características de resistência e deformabilidade *do núcleo de avanço* - permitirem a escolha dos instrumentos de estabilização *apenas em termos de contenção da cavidade*, o projetista poderá se limitar a estudar o problema em termos de “*convergência-contenção*” (figura 10). Se for preciso atuar também em termos de *contenção da montante*, prevenindo-se manifestações de fenômenos de extrusão, mesmo com valor reduzido do estado de tensões, o problema será analisado segundo modelo de “*extrusão-contenção*”.

Finalmente, se o estado das tensões for elevado a ponto de tornar sem influência as ações de contenção da cavidade e da montante, o projetista deverá atuar sobre a rigidez do núcleo, adotando soluções de pré-contenção da cavidade e precisará enfrentar o problema do dimensionamento e de verificação das intervenções no núcleo, recorrendo ao novo modelo “*extrusão - pré-contenção*”, que no passado foi objeto de estudos de vários autores (figura 11) e que hoje necessita - à luz da importância assumida pelo núcleo de avanço como instrumento de estabilização da cavidade - de mais estudos aprofundados e atualizados.

Intervenções de pré-contenção

No parágrafo anterior foi evidenciado como o núcleo de avanço - em função de sua própria rigidez - é capaz de:

- 1) *Produzir ações de pré-contenção*;



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

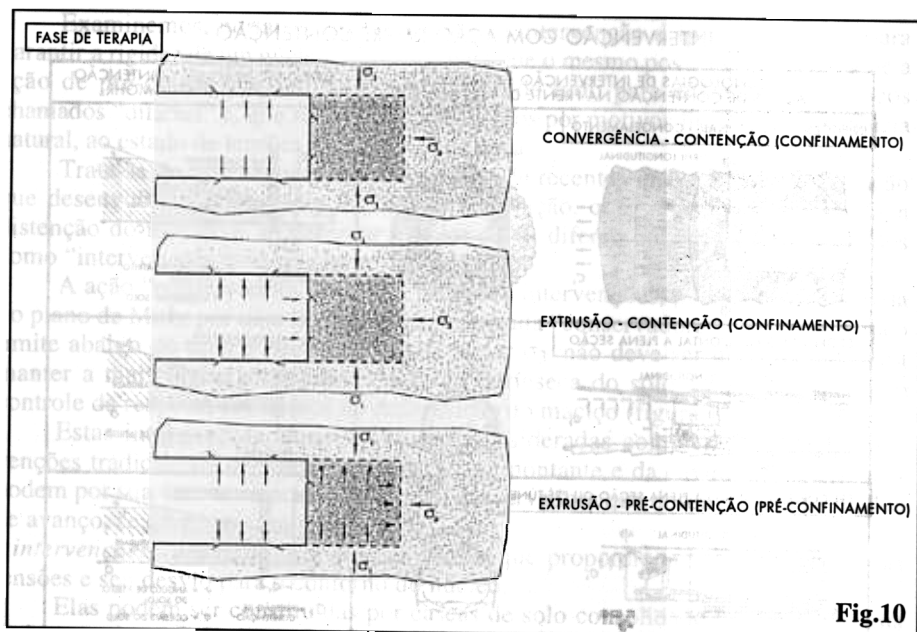


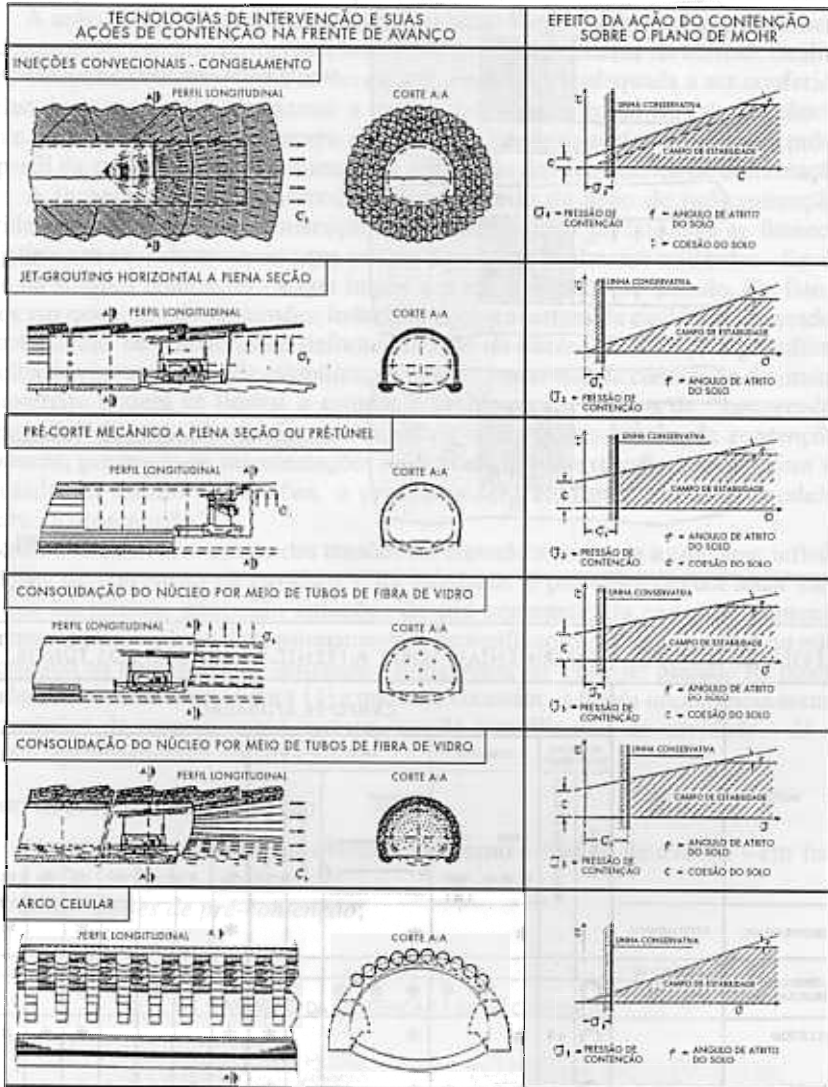
Fig.10

ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE A FRENTE DE AVANÇO DOS TÚNEIS																	
AUTOR	MÉTODO ADOPTADO	CAMPO DE APLICAÇÃO															
		GEOMETRIA DA CAVIDADE		COBERTURA		MACIÇO				PARÂMETROS ADOPTADOS							
		FORMA	Ø MÁX. ESTABILIZADO	BAIXA	ALTA	PARÂMETRO EDESPHO		ESTRATIFICADO	INCL. ABÍSSO								
		10 20 30	MAIS	C	Ø	D	Ø			σ_v	C'	γ'	E	G ₁	F _u	N	
BROMS-BENN.	EXPERIMENTAL			*		*					*				*		
LOMBARDI PANET-GUENOT	CRITÉRIO DE TENCÕES E DEFORMAÇÕES	○		*	*	*	*	*				*	*	*	*		
ELLSTEIN	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	○	4-8	*		*					*	*			*	*	*
TAMEZ		○	*	*	*	*					*	*	*	*	*	*	*
TAMEZ-GEN.		○	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
CHAMON-CO.	CÁLCULO À RUPTURA	○	4-8	*	*	*		*			*	*	*		*		
LECA-PANET		○	*	*	*	*	*				*	*	*	*	*		

Fig.11

INTERVENÇÃO COM AÇÃO DE PRÉ-CONTENÇÃO

ATA 311 10 16A



INTERVENÇÕES CONCLUÍDAS E REALIZADAS NOS ÚLTIMOS 10 ANOS

Fig.12

- 2) Produzindo ações de pré-contenção, de controlar a resposta em termos de deformação;
- 3) Controlando a resposta em deformação, de agir como instrumento de estabilização de um túnel em fase de construção.

Examinemos, portanto, quais os tipos de intervenção dispõe o projetista para garantir a rigidez de um núcleo de avanço para que o mesmo possa desenvolver aquela ação de pré-contenção, indispensável acima de tudo para enfrentar os maciços chamados “difíceis” e, que são assim considerados por motivos ligados a consistência natural, ao estado de tensões e a presença de água.

Trata-se de intervenções em sua maioria de recente concepção que - pela ação que desenvolvem a montante da face de escavação, que se destinam a impedir a distensão do maciço e a conservar o valor de σ_3 diferente de zero - são definidos como “intervenções conservadoras” (figura 12).

A ação “conservadora” exercida por essas intervenções, pode ser representada no plano de Mohr por uma linha, por isso chamada “conservadora”, que representa o limite abaixo do qual a tensão principal menor σ_3 não deve ser ultrapassada, para manter a mais inalterada possível a curva intrínseca do solo e para não perder o controle da resposta em termos de deformação do maciço (figura 13).

Estas intervenções - que devem ser consideradas complementares às intervenções tradicionais de simples contenção da montante e da cavidade (figura 14) - podem por sua vez, se relacionadas à ação conservadora que desenvolvem no núcleo de avanço, se distinguir em (figura 15):

- *intervenções conservadoras diretas*, são as que proporcionam a canalização das tensões e seu desvio para o contorno do núcleo.

Elas podem ser constituídas por cascas de solo consolidado mediante sistema de jet grouting sub-horizontal, ou cascas de concreto projetado com fibras (pré-corte mecânico e pré-túnel).

Elas agindo a montante da face de escavação desenvolvem uma ação protetora.

- *intervenções conservadoras indiretas*, são as que agindo diretamente sobre a consistência do núcleo de avanço, melhoram suas características de resistência e deformabilidade mediante aplicação de técnicas de consolidação (consolidação do núcleo através de instalação de tubos ou fitas de fibra de vidro) e se predispõem a manter estável o próprio núcleo, mesmo sem intervenções protetoras.

- *intervenções conservadoras mistas*, são as que agindo quer no contorno do núcleo com sistemas protetores, quer diretamente no interior do núcleo com técnicas de

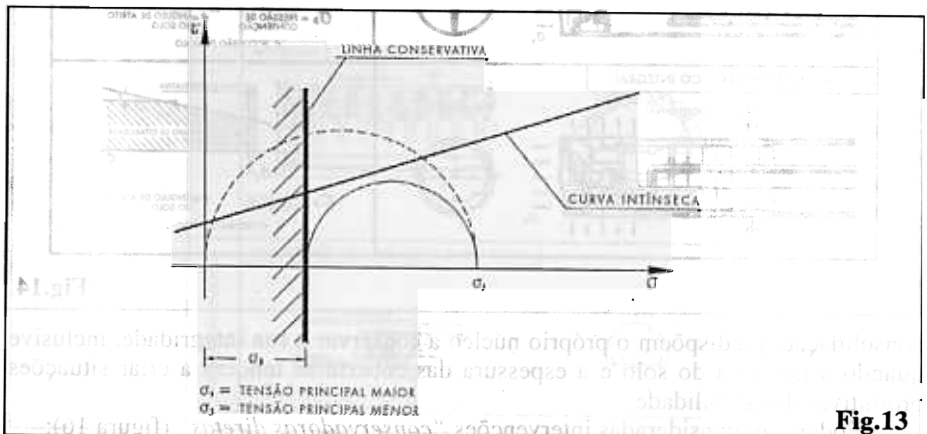


Fig.13

INTERVENÇÃO COM AÇÃO SÓ DE CONTENÇÃO

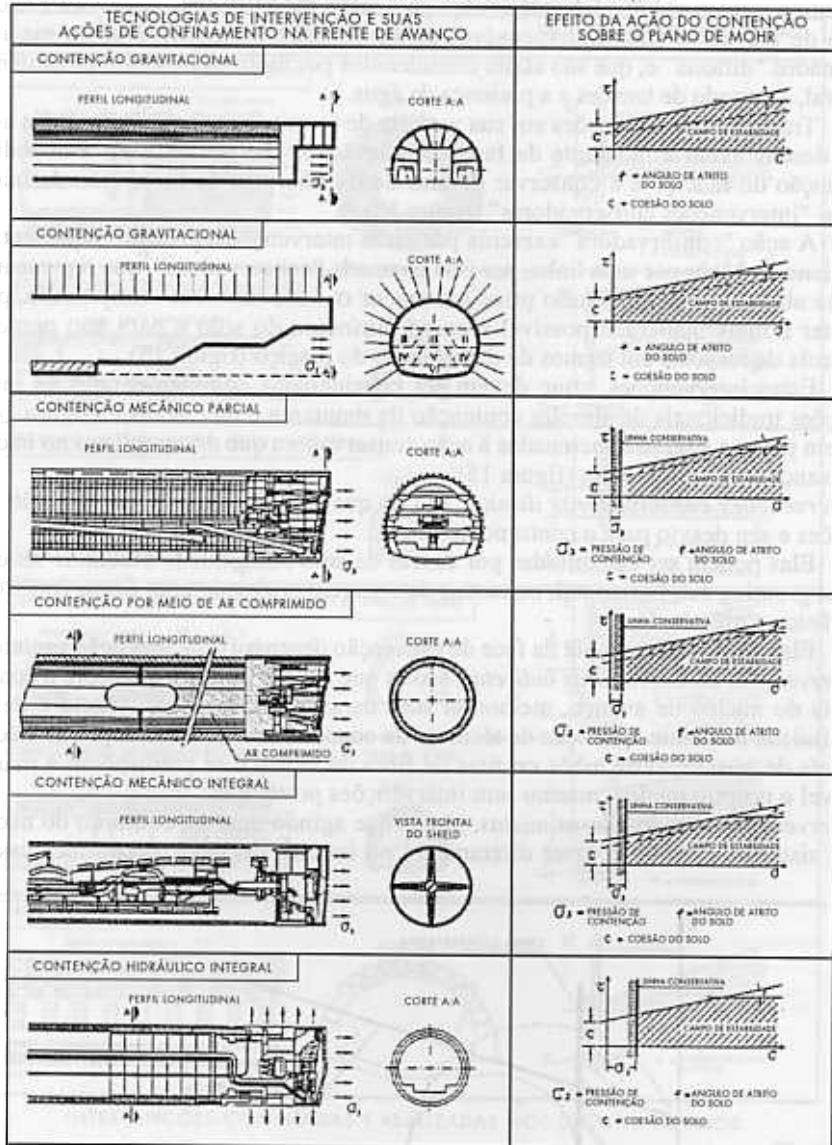
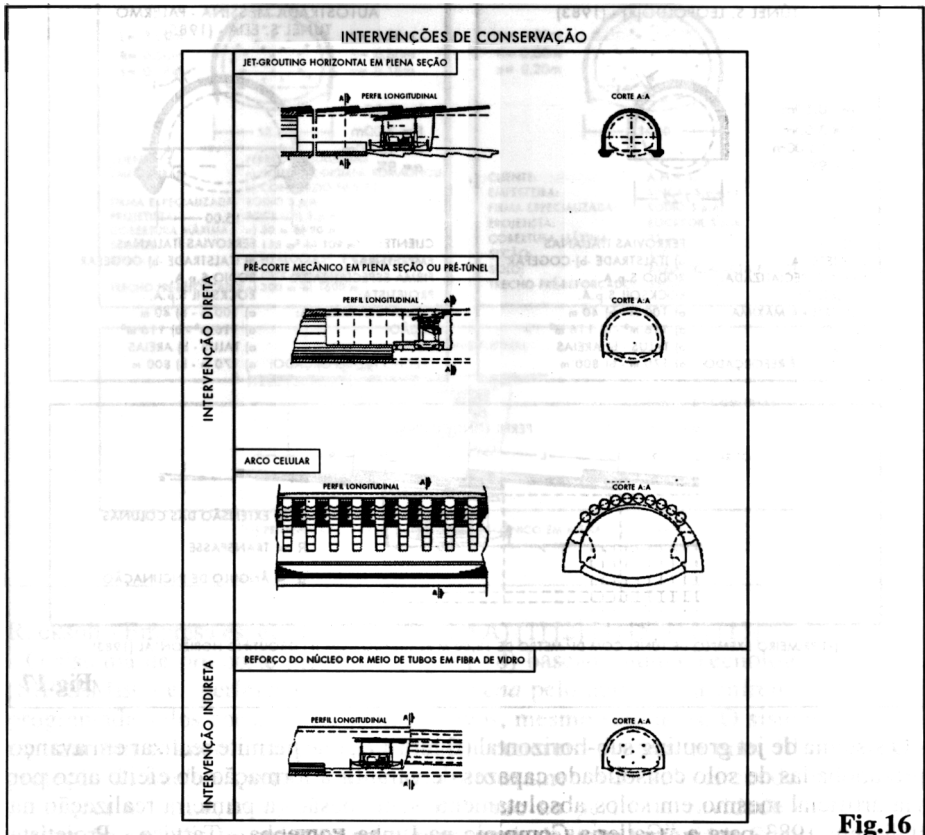
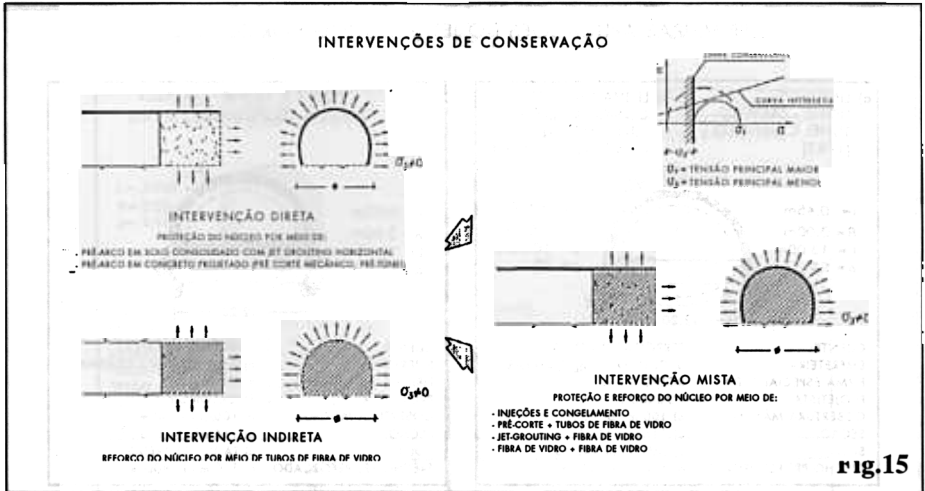


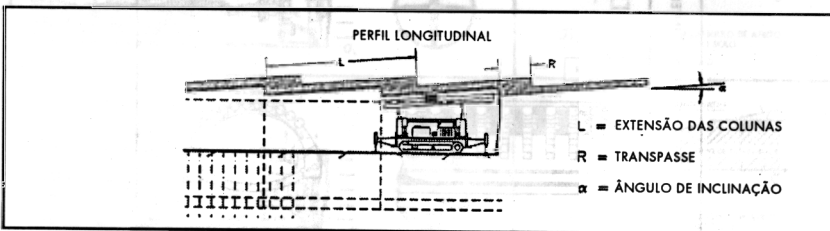
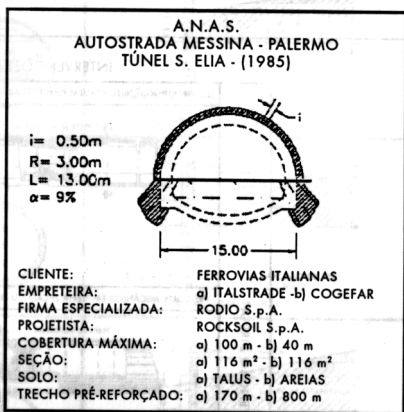
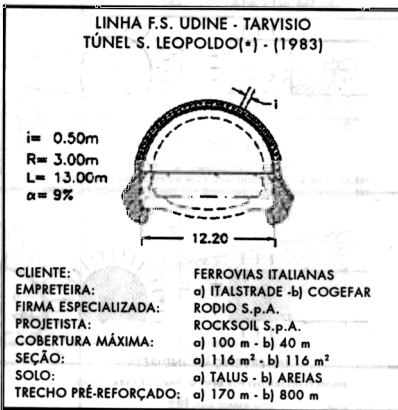
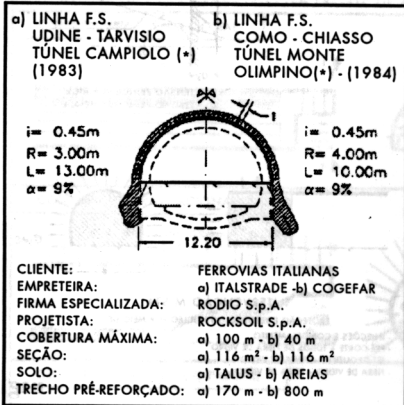
Fig.14

consolidação, predisõem o próprio núcleo a conservar a sua integridade, inclusive quando a natureza do solo e a espessura das coberturas tendem a criar situações proibitivas de estabilidade.

Podem ser consideradas intervenções “conservadoras diretas” (figura 16):



PRIMEIRAS APLICAÇÕES DO JET-GROUTING HORIZONTAL

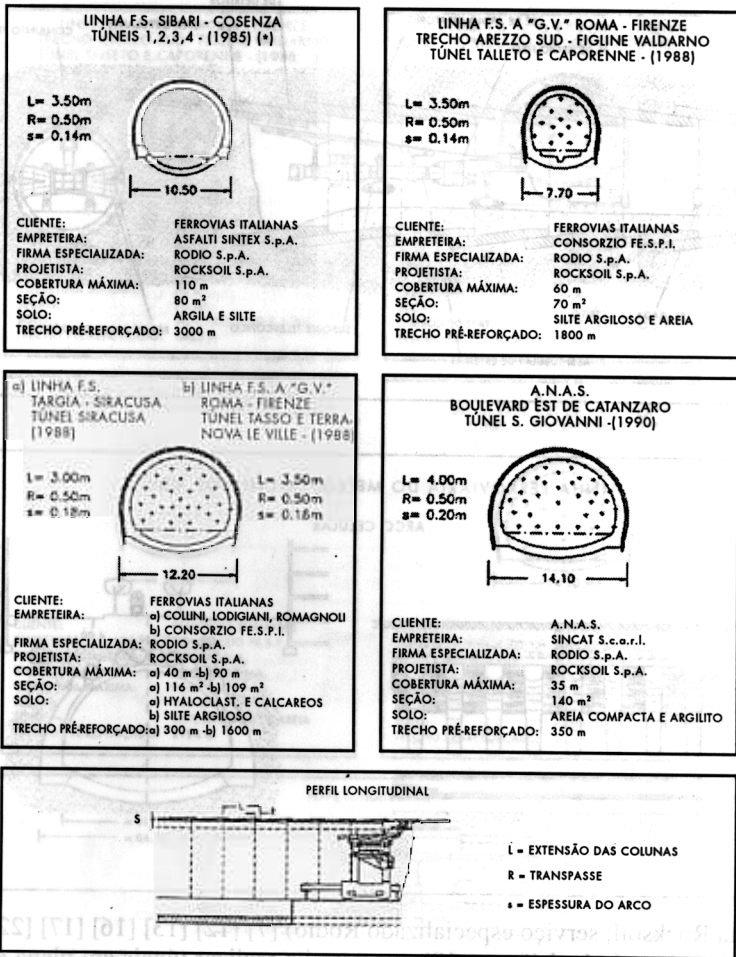


(+) PRIMEIRO EXEMPLO DE TÚNEL COM DIÂMETRO DE 12,00 M REALIZADO COM JET-GROUTING HORIZONTAL (1983)

Fig.17

- O sistema de jet grouting sub-horizantal (figura 17), que permite realizar em avanço pré-abóbadas de solo consolidado capazes de garantir a formação do efeito arco por via artificial mesmo em solos absolutamente sem coesão (a primeira realização na Itália em 1983 para a "Galleria Compiole na Linha Pontebba - Tarvisio - Projetista

PRIMEIRAS APLICAÇÕES DO PRÉ CORTE MECÂNICO EM PLENA SEÇÃO



(*) PRIMEIRA APLICAÇÃO DO PRÉ CORTE MECÂNICO EM PLENA SEÇÃO (1985)

Fig.18

Rocksoil - Empresa especializada Rodio S.p.A) [1] [2] [4] [5] [12] [13] [14] [18] [22];
- O sistema de pré-corte mecânico (figura 18) baseado numa Tecnologia Francesa (SIPREMEC) e aperfeiçoado para *seção plena* pelo autor, para enfrentar de forma programada solos coesivos ou semi coesivos, mesmo saturados. O sistema permite realizar em avanço uma pré-abóbada em concreto projetado com fibras para a proteção do núcleo, capaz de impedir o afrouxamento do solo circundante e assim favorecer a formação do efeito arco próximo ao perfil da cavidade (a primeira realização na Itália foi em 1985 em alguns túneis da linha ferroviária Sibari-Cosenza,

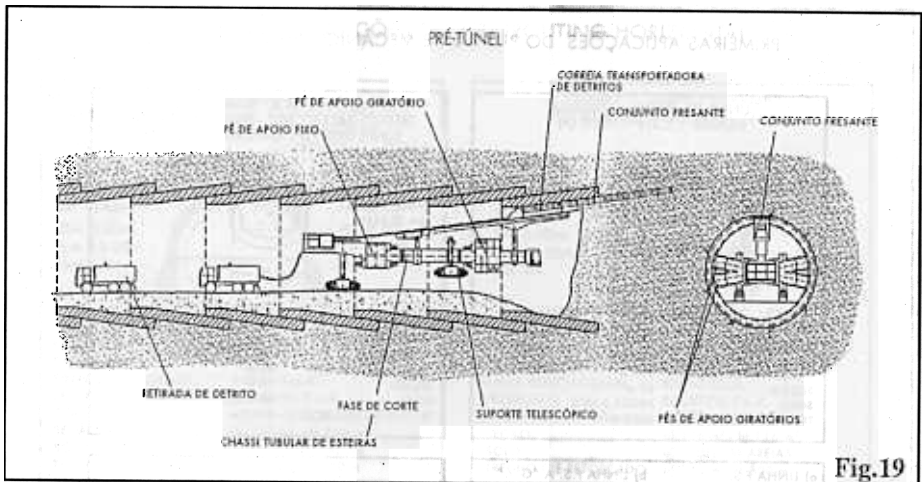


Fig.19

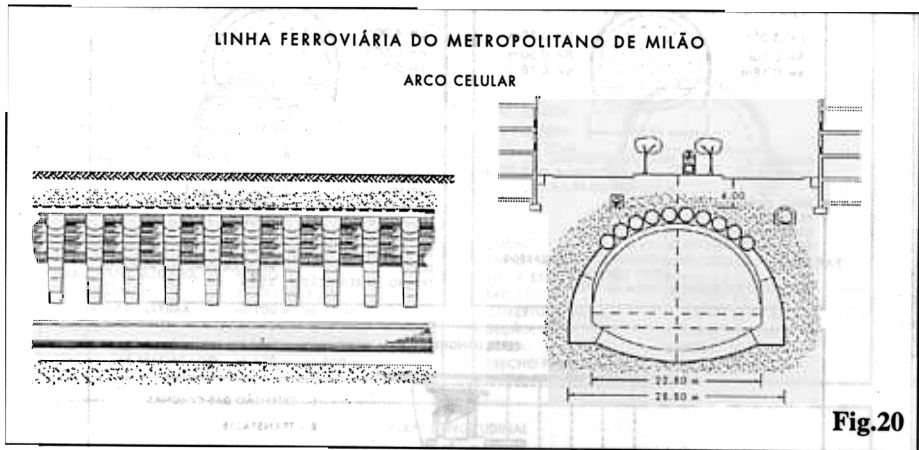


Fig.20

projetista Rocksoil, serviço especializado Rodio) [7] [12] [13] [16] [17] [22];

- O sistema do pré-túnel (figura 19) que permite realizar túneis em plena seção em solos difíceis, executando de forma contínua o lançamento do revestimento em concreto a montante da face de escavação. Tal tecnologia, que na Itália se encontra atualmente em fase experimental, tornará também possível realizar o alargamento de túneis rodoviários, de 2 para 3 faixas de tráfego, mantendo o tráfego durante a sua execução.

- O sistema do "arco celular" (figura 20) que resolve o problema de pré-fabricar o revestimento definitivo da obra a ser construída no subsolo, antes do início da escavação, permitindo realizar grandes cavidades corticais (até 60 m de vão), em área urbana em solos incoerentes, mesmo sob o lençol freático, praticamente sem causar recalques na sua superfície (primeira realização - Estação Venezia no Passante Ferroviário de Milão - Projetista Rocksoil) [6] [8] [9] [10] [11] [12] [22];

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

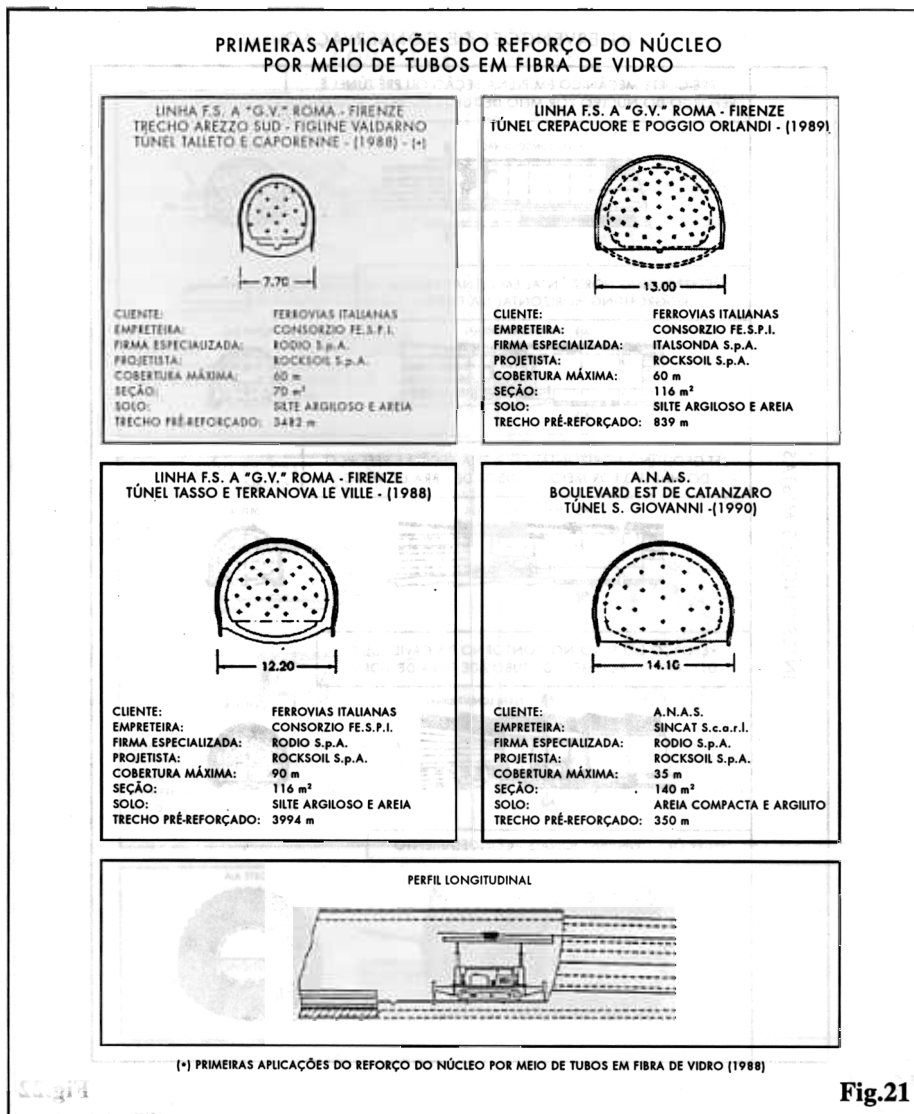
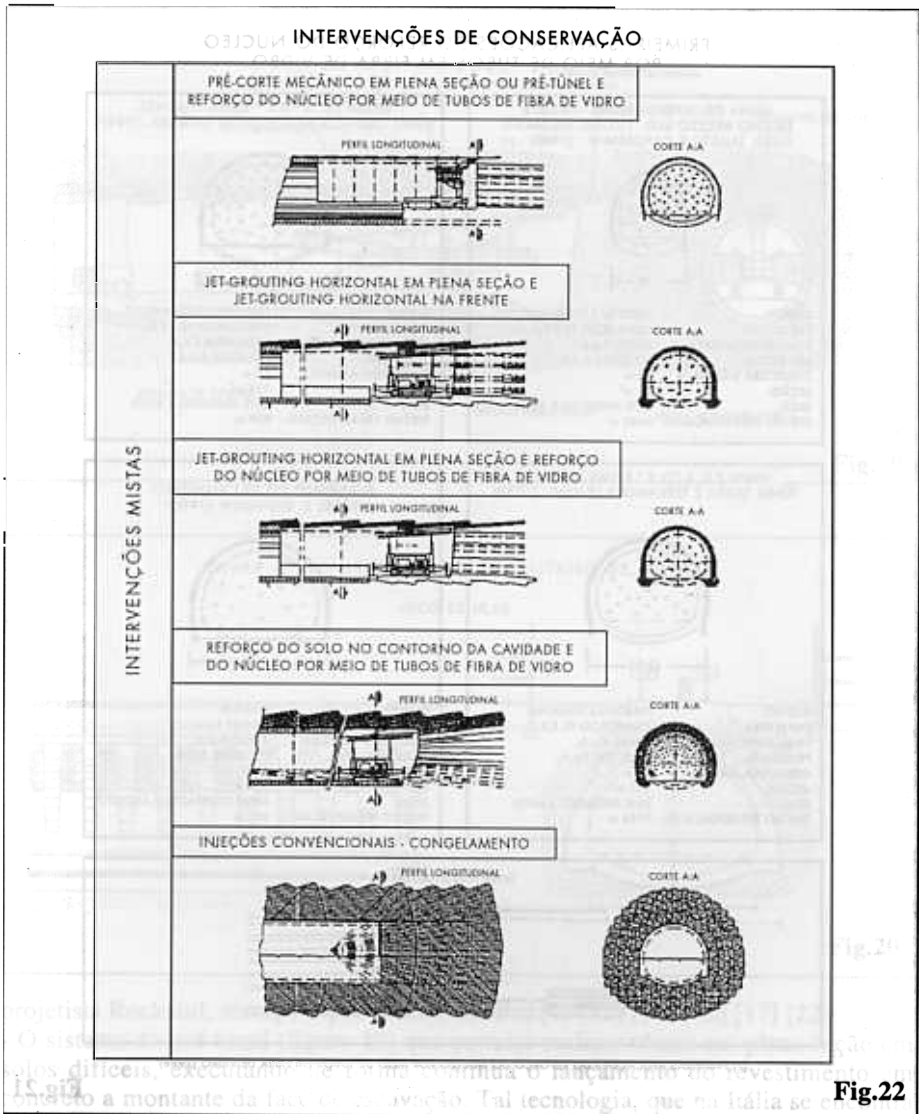


Fig.21

Pode-se considerar intervenção *conservadora indireta* :

- O sistema de pré-consolidação do núcleo na montante de avanço através de tubos ou fitas de fibra de vidro (figura 21) que permite regular a rigidez do núcleo, e consequentemente controlar a resposta em termos de deformação a montante e a jusante da face. O sistema tem larga aplicação, especialmente na escavação de túneis em solos argilosos em que fortes estados de tensão poderiam provocar a extrusão ou o colapso da montante (primeira realização em 1988 nos túneis ferroviários no V lote do trecho Arezzo Sul - Figline Valdarno da linha de alta velocidade Roma-



Florença - projetista Rocksoil) [7] [12] [17] [19] [22] [23] [24].

As intervenções “*conservadoras mistas*” (figura 22) se realizam operando contemporaneamente uma intervenção direta de proteção e uma indireta de reforço do núcleo.

Pode-se considerar “*intervenções conservadoras mistas*”:

- O pré-corte combinado com a pré-consolidação do núcleo mediante tubos de fibra de vidro (primeira realização em 1988 no túnel Tasso e no túnel Terranova-Le Ville na linha de alta velocidade Roma-Firenze - projetista Rocksoil) [7];

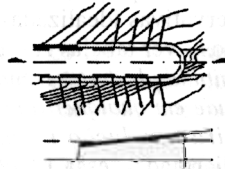
PRIMEIRAS APLICAÇÕES DE EMBOQUE DE TÚNEL
COM JET-GROUTING VERTICAL

LINHA F.S. PONTEBBA - TARVISIO
TÚNEL S. LEOPOLDO - (1985) - (*)



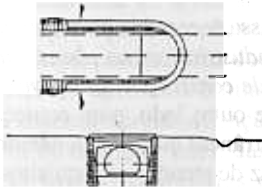
CLIENTE: FERROVIAS ITALIANAS
EMPREENHEIRA: CONSORZIO CARNIA
FIRMA ESPECIALIZADA: RODIO S.p.A.
PROJETISTA: ROCKSOIL S.p.A.
SOLO: TALUS

LINHA F.S. BARI - TARANTO
TÚNEL MADONNA DEL CARMINE - (1986)



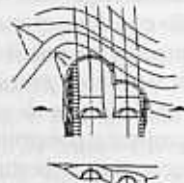
CLIENTE: FERROVIAS ITALIANAS
EMPREENHEIRA: CONSORZIO BATA
FIRMA ESPECIALIZADA: IGO S.p.A.
PROJETISTA: ROCKSOIL S.p.A.
SOLO: ARGILA

LINHA F.S. SIBARI - COSENZA
TÚNEL Nº 4 - (1985)



CLIENTE: FERROVIAS ITALIANAS
EMPREENHEIRA: ASFALTI SINTEX S.p.A.
FIRMA ESPECIALIZADA: RODIO S.p.A.
PROJETISTA: ROCKSOIL S.p.A.
SOLO: AREIAS E ARGILAS

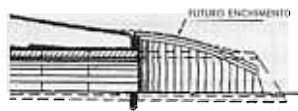
A.N.A.S.
AUTOSTRADA MESSINA - PALERMO
TÚNEL S. ELIA - (1985)



CLIENTE: A.N.A.S.
EMPREENHEIRA: FONTELLI S.p.A.
FIRMA ESPECIALIZADA: SOGIO S.p.A.
PROJETISTA: ROCKSOIL S.p.A.
SOLO: AREIAS

PERFIL LONGITUDINAL

PERFIL LONGITUDINAL
TÍPICO NO EIXO DO TÚNEL



(*) PRIMEIRAS APLICAÇÕES DO REFORÇO DO NÚCLEO POR MEIO DE TUBOS EM FIBRA DE VIDRO (1988)

Fig.23

- A pré-consolidação do contorno da cavidade do núcleo mediante tubos de fibra de vidro (primeira realização em 1991 - Túnel San Vitale na ferrovia Caserta-Foggia - projetista Rocksoil) [23] [24];
- A pré-consolidação do contorno da cavidade através de jet-grouting e a do núcleo através de tubos de fibra de vidro (primeira realização Galleria Vasto da linha Ancona-Bari - projetista Rocksoil).

Estas tecnologias, juntamente com outras singulares, como o sistema de jet grouting vertical (figura 23) que permite realizar no maciço, antes da escavação uma

região de pré-contenção formada por solo consolidado com cimento (o sistema resulta particularmente eficaz para execução de emboques em taludes de detritos sem prejudicar a sua estabilidade e com total respeito das condições ambientais -primeira aplicação em 1985 no emboque do Túnel San Leopoldo da linha ferroviária Pontebba-Tarvisio - projetista Rocksoil) [3] [15] [18] [22]), constituem as intervenções conservativas idealizadas pelo Autor e realizadas pela Rocksoil S.p.A. nos últimos 10 anos - ver tabelas A e B com listagem dos trabalhos executados.

A disponibilidade destas tecnologias conservativas, que permitem a pré-contenção de uma cavidade em qualquer tipo de maciço e com qualquer estado tensional, trouxe uma verdadeira revolução na maneira de enfrentar as escavações no subsolo.

A peculiaridade dessa revolução consiste no aspecto de que a ação de pré-contenção oferece a possibilidade de garantir em qualquer circunstância, inclusive em caso de maciços os mais difíceis, o respeito ao ciclo de escavação e ao cronograma geral, pois tal ação impede o afrouxamento do maciço a montante da face de escavação, evitando por consequência que se produzam as formas de instabilidade acima mencionadas, inclusive em algumas circunstâncias singulares em que as intervenções convencionais de simples "contenção" sempre falharam e sempre continuarão falhando (figura 24).

Essa situação constitui, portanto, a premissa necessária para começar, de um lado, a pensar concretamente na possibilidade de *industrializar as obras subterrâneas* e de poder planejar *em termos de prazo e de custo de construção, independente da natureza do maciço e das sobrecargas de cobertura*. De outro lado, para começar a refinar um novo método de projetar e construir obras subterrâneas que, independente da natureza do maciço e da sobrecarga da cobertura, seja capaz de atender os requisitos indispensáveis para que possam ser considerados completos e universalmente válidos, a saber:

- 1) ser aplicável em todos os tipos de maciços e em todas as situações estáticas;

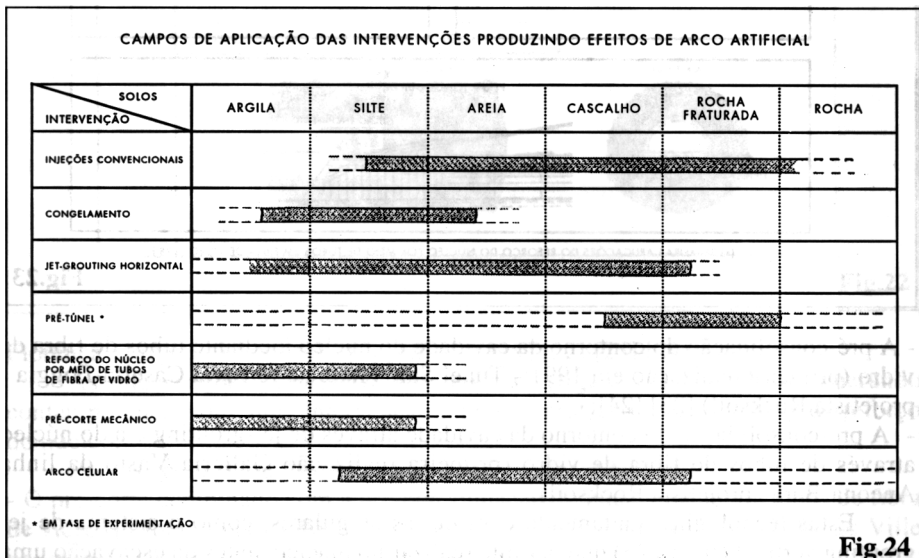


Fig.24

- 2) fornecer os instrumentos de projeto e métodos construtivos adequados para solucionar diferentes situações estáticas em qualquer tipo de maciço;
- 3) prever uma nítida separação entre o momento do projeto e o momento da construção da obra.
- 4) permitir planejamento da obra subterrânea com definição do prazo de construção e de seu custo final.

Essas exigências não podiam ser atendidas pelos métodos mais largamente adotados até hoje, seja as derivadas dos critérios de classificação geomecânica (e portanto só válidos para maciços rochosos), seja as derivadas de sistemas construtivos como o proposto por Rabcewicz.

O Novo Método Austríaco (NATM), em particular, que obteve larguíssima aplicação nos últimos trinta anos, representou, sem dúvida, na época de sua introdução, um notável progresso em relação ao passado. Ele teve principalmente o mérito de :

- considerar pela primeira vez o maciço como material de construção, orientando-se para ações de contenção e não de sustentação;
- introduzir a utilização de novas tecnologias de simples contenção com ação ativa como concreto projetado, tirantes e chumbadores;
- dar ênfase a necessidade de levantar e interpretar sistematicamente a resposta em termos de deformação do maciço, baseado na convergência da cavidade.

Nos dias de hoje, porém, à luz dos recentes progressos do campo de tecnologia e de cálculo, o NATM apresenta limitações importantes:






- apresenta um sistema de classificação incompleto e parcial, não sendo aplicável em todos os tipos de maciço e em todas as situações de tensão-deformação;
- menospreza as novas tecnologias continuando a supor, erroneamente, poder resolver todas as situações de tensão-deformação, através, apenas, de utilização de chumbadores, tirantes, cambotas e concreto projetado;
- despreza complementamente a importância do núcleo de avanço e a necessidade de usá-lo como instrumento da estabilização do túnel;
- não prevê uma fase de projeto nitidamente separada da fase de construção.

Para superar essas limitações, foi recentemente proposto um método que se baseia na análise das deformações controladas nas rochas e nos solos [20] [21].

Ele se apresenta como uma nova metodologia que, tomando conhecimento das possibilidades oferecidas pelos mais recentes instrumentos de pesquisa e de cálculo em fase de projeto, e das novas técnicas de avanço e estabilização da cavidade em fase de construção, valoriza em sentido prático as contribuições científicas e operativas do NATM e dos outros métodos utilizados no passado, interpreta-os de modo inovativo e, superando os próprios limites deles, constitui-se na sua evolução natural, propondo o seguinte:

- tomar em consideração um único parâmetro, ou seja, a resposta em termos de deformação do maciço a ação de escavação, a quem fizer referência, primeiro por via teórica, como objetivo de previsão e de controle, e em seguida, por via experimental, como objeto de leitura e interpretação para o acerto do projeto na obra;
- prestigiar a função do núcleo de avanço como instrumento de estabilização da cavidade em fase de escavação;
- classificar os túneis na base de categorias de comportamento relacionadas com as condições de estabilidade do núcleo de avanço e da face de escavação;

PROJETOS REALIZADOS COM INTERVENÇÕES DE CONSERVAÇÃO

ANO	CLIENTE	OBRA	Ø [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 N
1983	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Compicolo	12	170				
1984	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel M. Palis	12	200				
1984	F.S.	PAOLA-COSENZA Tunnel Santomerco	7	150				
1984	F.S.	COMO-CHIASO Tunnel M. Olimpino	12	800				
1985	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Leopoldo	12	50				1
1985	ANAS	MESSINA-PALERMO Tunnel S.Elia	15	150x2				1
1985	F.S.	SIBARI-COSENZA Tunnels 1,2,3,4	10	1300	2300	2300		
1986	F.S.	BARI-TARANTO Tunn. Madonna del Carm.	12	200				2
1986	F.S.	BARI-TARANTO Tunnel S.Francesco	12	100				2
1986	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Malborghello	12	150				1
1987	Commune Campinas	Passage souterrain de la gare	14	300x2				2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Comporosso	12	650				2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Rocco	12	600				
1988	ANAS	AUT. DEI TRAFORI Tunnel Valsesia	15	600				
1988	ANAS	S.S. 42 Tunnel Lovere	11	200				
1988	MM	TRANSVERSALE FERR. DE MILANO Station Venezia	30				250	
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunn. Tolieto e Caprenna	8	2500	2600	2800		4
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunnel Tasso	12	150		1650		2
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunn. Terranova le Ville	12	200	1800	2200		3
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunnel Poggio Orlandi	13	250		600		2
1988	F.S.	LIGNE A "GV" ROME-FLORENCE Tunnel Crespiuore	13	60		120		2
1989	ANAS	BOULEVARD DE CATANZARO Tunnel S.Giovanni	12		400	400		2
1989	ANAS	S.S. 42 Tunn. Costa Valpino	11			200		1
1989	Aqueduct des Pavilles	Aqueduct d'Ofanto	5			200		3
1989	F.S.	TARZIA-SIRACUSA Tunnel di Siracusa	12		1000	1000		
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villeneuve	12	275x2				2

REALIZADOS POR ROCKSOIL S.p.A. - MILÃO

Tabela A

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS.

PROJETOS REALIZADOS COM INTERVENÇÕES DE CONSERVAÇÃO

ANO	CLIENTE	OBRA	Ø [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 N
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Aivise	12	290x2				4
1989	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Tarvisio	16	1000				1
1989	SAT	AUT. LIVORNO-CMTAV. Tunnel Malenchini	12	900x2				2
1989	SAT	AUT. LIVORNO-CMTAV. Tunnel Rimazzana	12	900x2		900x2		2
1990	Commune de Rome	Passage souterrain via Cristoforo Colombo	12,5	150				
1990	ANAS	S.S. 1 Tunnel Montenero	11	150x2		2350x2		2
1990	LAURO	S.S. 38 Tunn. Valmagg. Bolladore	12	150				4
1990	COGEFAR	S.S. 38 Tunnel Mondadizza	12	60				1
1990	CARIBONI	S.S. 38 Tunn. Le Prese e Verzedo	12	100				2
1990	LODIGIANI	S.S. 38 Tunnel San Antonio	12	40				2
1990	TECNO- SVILUPPO	S.S. 38 Tunnel Tola	12	80				2
1990	SECOL	S.S. 38 Tunnel Cepina	12	70				1
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Levrogne	12	270x2				2
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villerot	12	240x2				4
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Les Creles	12	450x2				2
1990	MM	MILANO Boulevard peripherique est	11	70				2
1991	ANAS	S.S. 510 Lotti 5,6,7	11	900		400		15
1991	ANAS	S.S. 237 Tunnel Sabbio	11	300				3
1991	F.S.	CASERTA-FOGGIA Tunnel S.Vitale	12		300	1300		
1991	ANAS	S.S. 62 Tunnel M. Barro	11	100x2				1
1991	PIZZA- ROTTI	S.S. 470 Tunnel Lenna	12	30				
1992	ANAS	E 45 Tunnel Quarto	11	100x2		200x2		3
1993	F.S.	ANCONA-BARI Tunnel Vasto	10	1270	1850	4970		
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel S.Vito	12	130		200		1
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel Bellosguardo	12	125		360		2
1993	ANAS	S.S. 106 Tunnel Lofiri	11	90x2		90x2		2
1993	INTER- METRO	METRO DE ROME Stat. Baldo degli Ubaldi	21		120	120		

REALIZADOS POR ROCKSOIL S.p.A. - MILÃO

Tabela B

- integrar na fase de escolha e dimensionamento das intervenções de estabilização, os conhecidos enfoques “convergência-confinamento” e “extrusão-contenção” com aquele de “extrusão-pré-contenção”. Esse critério torna possível enfrentar o projeto e a construção dos túneis mais problemáticos assumindo o mesmo grau de segurança que é possível adotar com túneis de fácil execução, com a finalidade última de poder *prever com total certeza prazo e custo de execução*.

O objetivo da industrialização da construção de túneis é portanto hoje alcançável junto com o planejamento das obras que poderão finalmente ser elevadas à dignidade das demais obras da engenharia civil.

Um método de projeto e construção com as citadas características pode ser adotado como referência para o desenvolvimento de uma nova norma de especificações capaz de atender de modo adequado, às exigências de quem trabalha em obras subterrâneas.

REFERÊNCIAS

- [1] LUNARDI P., “Nouvelle Méthode de construction des écrans d’étanchéité dans les barragens en remblai”, XIV Congresso Internazionale su “Le Grandi Dighe” - Rio de Janeiro, 6-7 Marggio 1982.
- [2] LOUIS C., LUNARDI p., “Consolidation des sols par la technique de jet-grouting. Etat des connaissances et experiences”, Colloque International “Renforcement en place des sols des roches” - Parigi, Ottobre 1984.
- [3] FAORO L., LUNARDI P., PASQUINI M., “Il jet grouting nel consolidamento di imbocchi di gallerie autostradali”, Atti del Congresso Internazionale su “Grandi Opere Sotterrance” - Firenze 8-11 Giugno 1986.
- [4] LUNARDI P., MONGILARDIE., TORNAGHI R., “Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo”, Atti del Congresso Internazionale su “Grandi Opere Sotterrance” - Firenze 8-11 Giugno 1986.
- [5] CAMARGO GUAZZELLI J.L., LUNARDI P., “Tunel de Campinas : evolucion del diseno y problemas de operacion, Atti del Congresso Internazionale su “Le gallerie e l’Acqua”- Madrid, 12-15 Giugno 1988.
- [6] LUNARDI P., “L’emploi de microtunnels pour le realisation d’ouvrage souterrains de grande portee: l’”Arc Cellulaire”, Atti del Congresso Internazionale su “Le gallerie e l’Acqua”- Madrid, 12-15 Giugno 1988.
- [7] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., “Nouvelles orientations pour le project et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le preconfinement de la cavite et la preconsolidation du noyau au front”, Colloque International “Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7 - 100 Febbraio 1989.
- [8] COLOMBO A., LUNARDI P., LUONGO E., PIZZAROTTI E.M., “L’Arc Cellulaire pour la Station “Venezia” du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan”, Colloque International “Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7 - 100 Febbraio 1989.
- [9] LUNARDI P., “Un nuovo sistema costrutivo per la realizzazione di gallerie di

grande luce in terreni sciolti: l'Arco Cellulare", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989.

- [10] COLOMBO A., LUNARDI P., LUONGO E., "Innovative techniques for the realization of large diameter tunnels in loose land", Congresso Internazionale su "Progress and Innovation in Tunnelling" - Toronto 9-14 Settembre 1989.
- [11] LUNARDI P., "Un nouveau systeme constructif pour la realisation de tunnel de grande portee dans terrains non coherents: l'Arc Cellulaire", Colloque International "Les fondations des grands ouvrages" - UNESCO - Parigi 27-29 Marzo 1990.
- [12] LUNARDI P., PIZZAROTTI E.M., "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", Soft Ground Tunnelling Course - Instruction of Civil Engineers - Londra 10-12 Luglio 1990.
- [13] COLOMBO A., LUNARDI P., PIZZAROTTI E.M., TESSERIN G.D., "Preconsolidamento del terreno mediante jet-grouting nel sottopasso della Tangenziale Est di Milano da parte della Linea 3 della metropolitana", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"- Milano 18-20 Marzo 1991.
- [14] GOLINELLI G., LUNARDI P., PERELLI CIPPO A., "La prima applicazione del jet-grouting in orizzontale come precontenimento delle scavo di gallerie in terreni incoerenti", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"- Milano 18-20 Marzo 1991.
- [15] LUNARDI P., "L'impiego del jet-grouting per l'attacco di gallerie in terreni soffici", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"- Milano 18-20 Marzo 1991.
- [16] ARSENA F.P., FOCARACCI A., LUNARDI P., VOLPE A., "La prima applicazione in Italia del pretaglio meccanico", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"- Milano 18-20 Marzo 1991.
- [17] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo"- Milano 18-20 Marzo 1991.
- [18] LUNARDI P., "Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting", Quarry and Construction, Marzo 1992.
- [19] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling" - Acapulco 16-20 maggio 1992.
- [20] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method", VI Forum Europeo di Ingegneria Economica - Università Bocconi - Milano, 13-14 Maggio 1993.
- [21] LUNARDI P., "Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo", SAMOTER: Convegno su "La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo" - Verona, 27-28 Maggio 1993.

- [22] LUNARDI P., "Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles", Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Septembre 1993.
- [23] LUNARDI P., "Glass-resin tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE: Seminar on "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering"- Bologna, 22 Ottobre 1993.
- [24] LUNARDI P., "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années 80", Paris, 18 Novembre 1993.
- [25] AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992.
- [26] ITALFERR SIS T.A.V. S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992.
- [27] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993.

AB

MS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS

CBT



CBT - COMITÊ BRASILEIRO DE TÚNEIS

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SEGUNDO O MÉTODO BASEADO NAS ANÁLISES DAS DEFORMAÇÕES CONTROLADAS NAS ROCHAS E NOS SOLOS

2ª Parte

(Importância da Pesquisa Experimental e seus Resultados).

Prof. Eng. Pietro Lunardi

Tradução: Eng. Paolo Mosiici

Eng. Akira Koshima

1995

Publicação Original: "Progetto e Costruzione Di Gallerie Secondo L' Approccio Basato Sull'Analisi Delle Deformazioni Controllate Nelle Rocce e Nei Suoli". Parte Seconda: "Ruolo e Risultati Della Ricerca Sperimentale", publicado na revista *Quarry and Construction*, Marzo/95

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SEGUNDO O MÉTODO BASEADO NAS ANÁLISES DAS DEFORMAÇÕES CONTROLADAS NAS ROCHAS E NOS SOLOS*

Prof. Ing. Pietro Lunardi
Universidade de Parma, Itália
Rocksoil S.p.A., Milão, Itália

Segunda Parte

IMPORTÂNCIA DA PESQUISA EXPERIMENTAL E SEUS RESULTADOS

Premissa

Na primeira parte do artigo, “Pré-sustentação e Pré-contenção”, publicado pela ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, foi feita uma série de afirmações e considerações que podem ser resumidas sinteticamente nos seguintes pontos :

- 1) a estabilidade de uma cavidade depende da formação do “efeito-arco”, ou seja da canalização do fluxo das tensões no contorno da cavidade;
- 2) consequentemente o objetivo prioritário do projetista é analisar se o “efeito-arco” poderá se instaurar durante a escavação da cavidade e *qual a sua forma*;
- 3) a confirmação da instauração do “efeito-arco” é dada pela leitura e interpretação da *resposta do maciço diante da ação de escavação, em termos de deformação*;
- 4) a resposta em termos de deformação *se produz à montante da face de escavação*, no âmbito da região perturbada pelas sobretensões geradas no maciço no contorno da cavidade, e depende da natureza do maciço submetido a determinado estado de tensões e das modalidades de escavação da frente (ação);
- 5) a resposta em termos de deformação manifesta-se primeiro na frente de avanço com fenômenos de *extrusão e pré-convergência* e, em seguida, no contorno da cavidade com fenômenos de *convergência* que depende em boa parte dos primeiros. Extrusão, pré-convergência e convergência dependem *direta ou indiretamente da rigidez do núcleo de avanço*, assim como, todas as demais manifestações de instabilidade sucessivas;
- 6) para a estabilidade do túnel, de fato, não se pode prescindir da estabilidade do seu núcleo de avanço, cujo comportamento em termos de tensões e deformações deve ser, portanto, objeto de estudo prioritário por parte do projetista de túneis;
- 7) neste enfoque, o problema da estabilidade de um túnel é intrinsecamente *tridimensional* e como tal pressupõe oportuna escolha do instrumento de cálculo;

* Traduzido pelos Eng^{os}. Paolo Mosiici e Akira Koshima, Novatecna Consolidazioni e Costruzioni S. A., do original “Progetto e Costruzione Di Gallerie Secondo L’Approccio Basato Sull’Analisi Delle Deformazioni Controllate Nelle Rocce e Nei Suoli. Parte Seconda : Ruolo e Risultati Della Ricerca Sperimentale”, publicado na revista Quarry and Construction, Marzo/1995.

- 8) o *núcleo de avanço* pode ser considerado como a ferramenta principal de estabilização do túnel a curto e a longo prazo . A curto prazo porque é capaz de condicionar a resposta a nível de deformação. A longo prazo porque é capaz de uniformar e reduzir a valores mínimos as cargas que, por causa do avanço, se produzem no revestimento final e com as quais está sendo dimensionado e verificado. O núcleo, portanto, pode ser adotado como referência para um novo tipo de classificação das obras subterrâneas baseado não mais em classes geomecânicas, mas sim em categorias de comportamento “tenso-deformativo”;
- 9) a aceitação disto, permitiu de um lado o aperfeiçoamento de um novo conceito de pré-contenção da cavidade e, de instrumentos inovadores de estabilização (“intervenções conservativas”) e, de outro lado, imaginar uma maneira nova de enfocar projeto e construção, baseada na análise das deformações controladas, que seja válida em qualquer tipo de maciço e em qualquer condição de tensão-deformação;
- 10) finalmente, tornou-se possível projetar e construir túneis em qualquer contexto geomecânico e em qualquer situação “tenso-deformativa”, respeitando prazos e custos previstos.

Chegou-se a estas importantes conclusões depois de 25 anos de pesquisas conduzidas na base de um programa de estudos e observações, progressivamente desenvolvido em três fases principais e aplicado sistematicamente no decurso da construção de mais de 250 Km de túneis, nos mais variados tipos de maciços e nas mais variadas condições de tensões (ver 1ª parte do artigo publicado pela ABMS, tabelas A e B, pgs. 28 e 29).

Neste ponto, antes de iniciar a exposição dos conceitos básicos da nova tendência de projeto e construção de túneis baseado na Análise das DEformações COntroladas em Rochas e Solos (ADECO - RS), julga-se imprescindível expor as pesquisas e as observações que levaram a formular as afirmações antes mencionadas, ressaltando, porém, que o que consta nos exemplos a seguir se repetiu em outras numerosas obras subterrâneas, que por motivo de espaço não serão apresentadas.

A pesquisa sobre a resposta em termos de deformação do maciço

Partindo da consideração que :

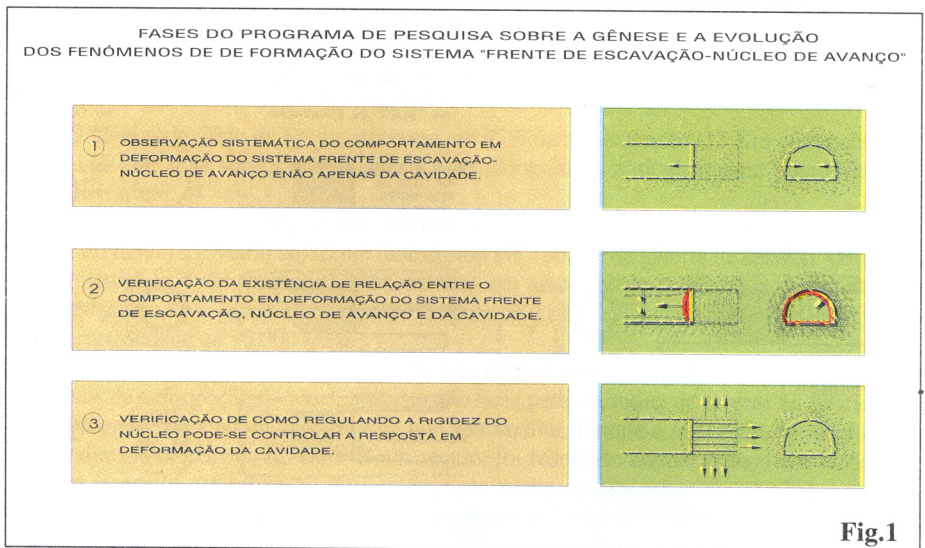
- 1) a estabilidade de uma cavidade a curto e a longo prazo é estritamente ligada à formação do “efeito-arco”, que deve constituir o objetivo prioritário do projetista de túneis;
- 2) a formação do “efeito-arco” e a sua instalação em relação à cavidade são sinalizadas pela “resposta em termos de deformação” do maciço à ação da escavação, em termos de magnitude e “tipologia”;

resultou evidente a necessidade de se estudar profundamente as relações entre modificação do estado “tensional” no maciço induzida pelo avanço num túnel e a subsequente resposta em termos de deformação no mesmo.

Em particular, julgou-se indispensável concentrar a atenção sobre gênese, evolução, controle e estabilização da resposta em termos de deformação.

Para este fim (fig. 1) :

- i) resolveu-se dedicar um primeiro período de tempo, denominado “primeira fase de pesquisa”, à observação sistemática do comportamento em termos de deformação do sistema frente-núcleo de avanço, e *não apenas da cavidade*, como é sugerido e proposto ainda hoje pelo método NATM e demais métodos derivados;
- ii) num segundo período de tempo, denominado “segunda fase de pesquisa”, procurou-se verificar a existência de correlação entre comportamento da deformação do sistema frente-núcleo de avanço (extrusão e pré-convergência) e o comportamento da cavidade (convergência), baseado em análises aprofundadas - principalmente em termos cronológicos -



dos fenômenos de instabilidade observados ao longo da execução de numerosos túneis, nos mais variados tipos de maciços e nos mais variados estados de tensão - deformação;

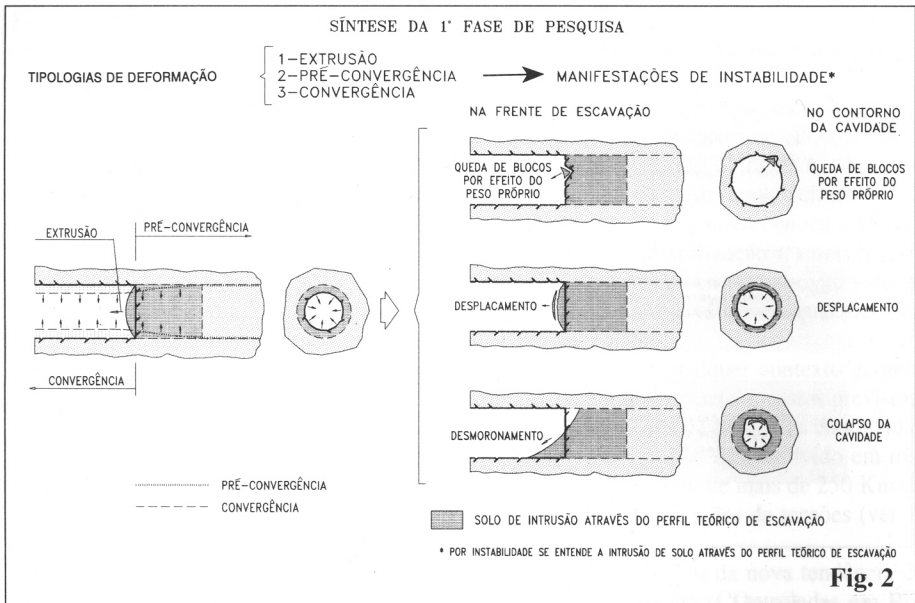
iii) uma vez esclarecido que o comportamento em termos de deformação da cavidade é sistematicamente condicionado pela rigidez do núcleo de avanço, em um terceiro período de tempo, denominado “terceira fase de pesquisa”, trabalhou-se visando verificar até que ponto, *atuando na rigidez*, e portanto na deformabilidade do núcleo, se poderia *controlar a resposta da deformação da cavidade*.

Primeira fase de pesquisa

A primeira fase de pesquisa (observação sistemática do comportamento das deformações do sistema frente-núcleo de avanço) foi conduzida através da execução de controles, quer instrumentais, quer visuais, sobre o comportamento das deformações das paredes de escavação, com especial atenção para os seguintes fenômenos (fig. 2) :

- a) *extrusão da frente* que, conforme o tipo de material e do estado de tensão, pode se manifestar com geometria de deformação mais ou menos axial-simétrica (embarrigamento da frente) ou de tombamento gravitacional (rotação da frente);
- b) *pré-convergência da cavidade*, ou seja, convergência do perfil teórico à montante da face de escavação e estritamente dependente das características de deformabilidade do núcleo associado ao estado de tensão existente;
- c) *convergência da cavidade*, que se manifesta através da redução da seção teórica de escavação.

Para este fim, no que diz respeito aos controles experimentais, além da execução sistemática das conhecidas medidas de convergência da cavidade, na superfície e em profundidade, foram concebidos, preparados e executados novos modelos de controles, que permitissem o estudo aprofundado, numa determinada seção, sobre o comportamento das deformações do maciço *antes, durante e depois* da chegada da frente de escavação, com especial ênfase na região da própria frente.



Estes novos modelos de controle foram as medidas de pré-convergência executadas pela superfície através da instalação - toda vez que fosse viável pela geomorfologia do maciço e pela dimensão da cobertura - de instrumentação com "multibases" para medição das deformações (extensômetros e "sliding micrometers"), introduzidas verticalmente no maciço em correspondência ao topo e as laterais do túnel em construção.

Na maioria dos casos, juntamente com as medidas de pré-convergência, executavam-se, também, *medidas de extrusão* no núcleo de avanço, através de um "sliding micrometer" introduzido horizontalmente no próprio núcleo, complementadas por nivelamentos topográficos através de pinos instalados na frente de escavação.

Com relação às citadas "tipologias" de deformação, as observações visuais realizadas sistematicamente pelo interior da cavidade permitiram, como foi adiantado na primeira parte desta exposição, associar a elas as *manifestações de instabilidade* detectadas ou na frente ou no contorno da cavidade.

Segunda fase de pesquisa

Uma vez definidas as "tipologias" de deformação e as manifestações de instabilidade que se podem produzir sobre o núcleo à frente e sobre o contorno da escavação de um túnel, pôs-se a questão se, através das observações da primeira fase, de alguma forma, seria possível receber uma orientação sobre o tipo e a magnitude que assumiriam as manifestações de instabilidade. Iniciou-se, portanto, a segunda fase de pesquisa - verificação da existência de *eventuais correlações* entre o comportamento em termos de deformação do sistema frente-núcleo de avanço (extrusão e pré-convergência) e aquele do trecho escavado (convergência) - a qual foi conduzida mediante o estudo, a observação e o controle dos eventos de deformação da frente e do trecho escavado, com particular atenção à sua magnitude e sequência cronológica, em função dos sistemas, das fases e das velocidades de escavação que eram adotadas a cada vez.

Antes de ser expostos os resultados obtidos nesta fase experimental, torna-se indispensável ilustrar brevemente, com alguns exemplos significativos, as observações realizadas.

Exemplo do túnel rodoviário do Frejus/1973

O túnel rodoviário do Frejus atravessa em 95% da sua extensão (13 Km com cobertura de até 1700 m) uma formação metamórfica de calcoxistos, litologicamente homogênea ao longo do traçado.

O projeto do túnel pôde contar com uma pesquisa geológica e geomecânica feita do interior do túnel ferroviário adjacente (construído em 1860) e da galeria de serviço. Os ensaios de resistência e deformabilidade executados em amostras de calcoxistos mostravam os seguintes parâmetros geotécnicos médios : ângulo de atrito de 35°, coesão de 3 MPa, módulo de deformabilidade de 10.000 MPa.

No contexto do projeto original (1975) não constavam previsões sobre o comportamento em termos de deformação do túnel, pois isto não fazia parte da rotina de projeto na época.

Baseado na experiência adquirida por Sommeiller durante a execução do túnel ferroviário adjacente, ocorrida há mais de um século, foi resolvido adotar avanço em seção plena, com imediata estabilização do contorno em rocha de espessura de aproximadamente 4,50 m, mediante aplicação de chumbadores ativos de coquilha, juntamente com concreto projetado. O revestimento definitivo de concreto, com 70 cm de espessura, deveria ser executado logo em seguida.

A análise dos fenômenos de deformação constituiu a parte mais significativa do conjunto de observações e medidas executadas no decorrer da obra, a fim de manter sob controle as intervenções estabilizadoras aplicadas no maciço rochoso, tendo em vista a circunstância excepcional de que não era a primeira vez em que se iria escavar um túnel em um maciço homogêneo (calcoxisto) com cobertura variável, sujeita a tensões variáveis e crescentes com a cobertura (0 a 1700 m).

Até aproximadamente 500 m de cobertura, o maciço permanecia em campo elástico e, portanto, o túnel mostrava um comportamento de *frente estável*, com manifestações de deformações desprezíveis e com instabilidade na frente e no contorno da cavidade devida apenas aos deslocamentos gravitacionais.

Aumentando a cobertura, junto com o estado “tensional”, o maciço rochoso entrava em campo elasto-plástico e o túnel assumia um comportamento de *frente estável a curto prazo*, com manifestações de convergência no contorno de ordem decimétrica (convergência no diâmetro de 10 a 20 cm). A tal faixa de rocha armada estava em condições de colaborar eficazmente para a estabilidade do túnel, limitando o tamanho das convergências e evitando o aparecimento consequente das manifestações de instabilidade.

O avanço da escavação, em virtude da boa qualidade da rocha, progredia com aproximadamente 200 m por mês, quando na progressiva 5173 m teve uma paralisação temporária do serviço devido às férias coletivas de verão, com a frente estando em maciço homogêneo com cobertura de aproximadamente 1200 m (fig. 3).

A seção instrumentada de convergência nº 6, instalada logo em seguida, a distância de apenas 1m da frente, apresentava após 15 dias de paralisação, uma deformação máxima de aproximadamente 10 cm.

Tratava-se com certeza de deformação só de fluência (a carga constante), pois a frente ficou neste tempo completamente parada.

Na retomada do serviço a convergência diametral na mesma seção mostrou um incremento abrupto que atingiu 60 cm após três meses, valores nunca antes medidos. Com o

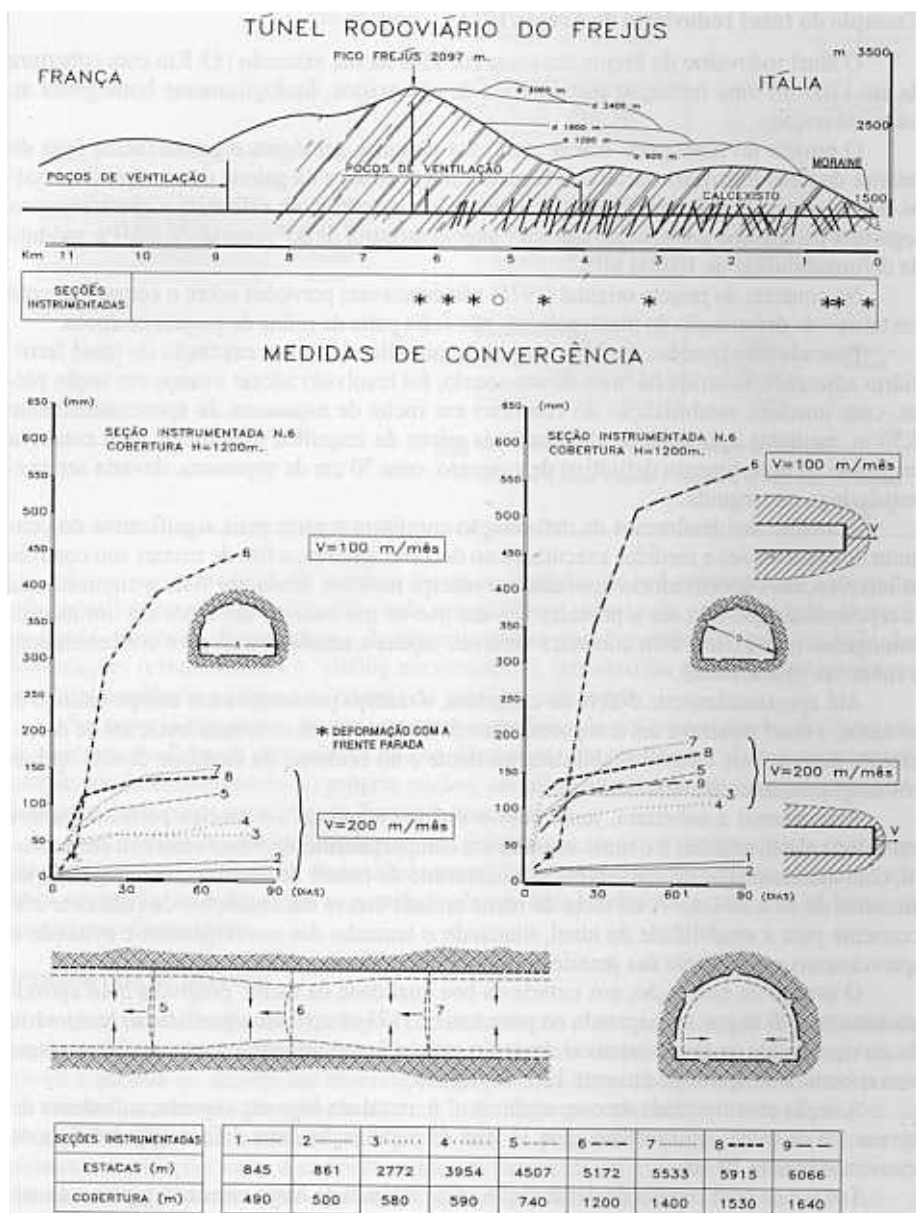


Fig.3

prosseguimento da escavação, após poucas dezenas de metros, as convergências voltaram a valores normais de aproximadamente 20 cm.

Faz-se necessário mencionar que antes da paralização dos serviços, a cavidade tinha sido consolidada com mais de 30 chumbadores por metro linear, porém nenhum tipo de intervenção tinha sido realizada no núcleo.

Com a retomada do avanço, a intervenção de estabilização da cavidade continuou sendo aplicada com a mesma sistemática anterior.

Deduziu-se então que, durante a paralização da obra, o núcleo da frente de escavação desprovido de intervenções de consolidação, tivera tempo bastante para extrudar-se em regime elasto-plástico, dando início a um fenômeno de "distensionamento" por fluência do maciço ao seu redor (pré-convergência), que por sua vez teria causado esse grande incremento das convergências na cavidade (fig. 3).

Exemplo do túnel Santo Stefano (1984)

O túnel Santo Stefano faz parte do novo traçado da linha férrea Genova-Ventimiglia, no trecho entre San Lorenzo al Mare e Ospedaletti.

O traçado atravessa a formação de "flysch" de Helmitoidi característica da Liguria Ocidental. Trata-se de xistos argilosos e argilo-arenosos com delgadas camadas de arenitos e calcários margosos dobrados e intensamente fraturados.

A feição argilo-xistosa é acentuadamente lamelar. Uma região de transição muito tectonizada marca a passagem entre o maciço tipo H2 e tipo H1, mais calcário margoso da formação (fig. 4).

Os ensaios de resistência em amostras indicaram valores de ângulo de atrito variáveis entre 20° e 24° e da coesão entre 1,5 e 0 MPa.

Neste caso também, no começo da obra em 1982, não tinham sido feitas previsões do comportamento de deformação do túnel.

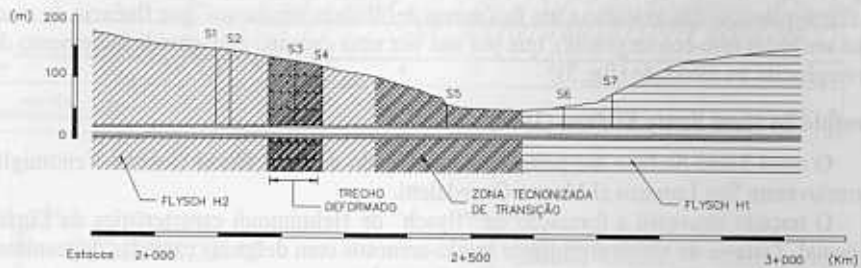
O projeto original preconizava avanço em plena seção, com instalação de cambotas e aplicação de concreto-projetado como revestimento de primeira fase e um revestimento final de concreto estrutural com 110 cm de espessura.

Durante a execução da obra constatou-se que, enquanto a escavação progredia em região de comportamento elástico, os fenômenos de deformação da frente e da cavidade eram absolutamente desprezíveis e as manifestações de instabilidades localizadas eram quase ausentes (comportamento de *frente estável*). Logo que o avanço penetrou em uma região sujeita a estados "tensionais" remanescentes de origem tetônica, o maciço se comportou em condições elasto-plástica e as manifestações de deformações começavam a causar alguma dificuldade; inclusive, concomitantemente com o surgimento de consideráveis empuxos assimétricos causados pela presença de corpos rígidos espalhados na matriz plástica do solo. Simultaneamente na frente de avanço ocorriam os deslocamentos, indicação certa de existência de um movimento de extrusão típico de uma situação de *frente estável a curto prazo*, enquanto as convergências assumiam valores decimétricos.

De repente, como a situação "tensional" do maciço pelo visto tinha evoluído até chegar no campo de ruptura, verificou-se o completo colapso da frente (situação de *frente instável*).

Decorridas poucas horas, seguiu-se um colapso da cavidade também num trecho de mais de 30 metros atrás da face de escavação, com convergências diametrais superiores a 2 metros, inclusive em região já estabilizada com cambotas e concreto projetado (fig. 4 e foto 1).

LINHA FÉRREA GENOVA-VENTI MIGLIA - TÚNEL S. STEFANO
TRECHO DEFORMADO



T = SUCESSÃO CRONOLÓGICA DOS ACONTECIMENTOS

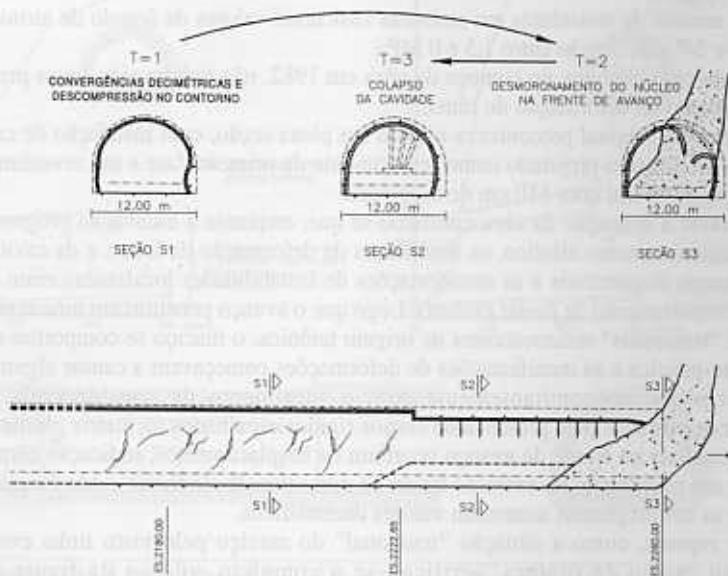


Fig.4



Foto 1 - Túnel S. Stefano: Colapso da cavidade

Cabe observar aqui que o tipo de solo atravessado era substancialmente igual nas três situações evidenciadas de tensão-deformação e que o único fenômeno de colapso da cavidade, com convergência da ordem métrica - inclusive em uma parte do túnel já estabilizada - só se verificou quando não houve contribuição da rigidez do núcleo da frente de avanço.

Exemplo do túnel Tasso (1988)

O túnel Tasso faz parte de uma série de túneis construídos em meados dos anos 80 para a realização de nova Linha Férrea de Alta Velocidade Roma-Florença (fig. 5). A região em que está implantada a obra pertence a bacia lacustre de "Valdarno Superiore", e é constituída de areias siltosas e silte arenosos intercalados por camadas argilo-siltosas contendo lentes e camadas arenosas saturadas.

O projeto original previa avançar em *meia seção* e estabilização do contorno com cambotas e concreto projetado. As cambotas vinham sendo vinculadas na base por meio de tirantes sub-horizontais, sendo apoiadas sobre microestacas ou sobre colunas de solo-cimento de "jet grouting".

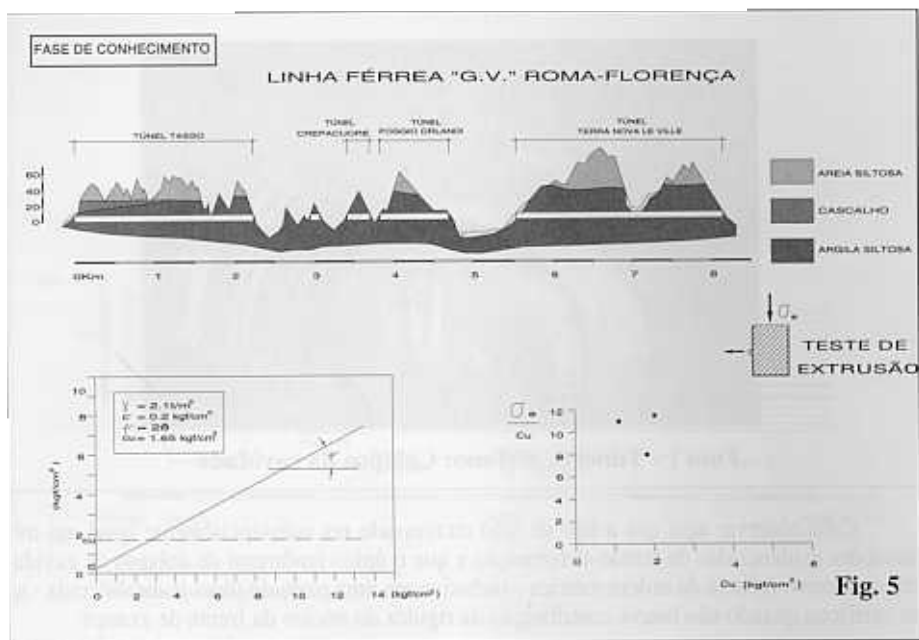
No começo, em condições de frente *estável a curto prazo*, a escavação não deu lugar a apreciáveis fenômenos de deformação, nem na frente nem na cavidade.

Aumentando a cobertura - e, portanto, o estado tensional do maciço, inclusive devido as baixas características geomecânicas do maciço atravessado - passou-se rapidamente de uma situação de frente estável a curto prazo para uma de *frente instável*. Ocorreu o colapso da cavidade com convergências diametrais da ordem de 3 a 4 metros, afetando um trecho de aproximadamente 30 a 40 metros de túnel (fig. 6).

Resultados da segunda fase de pesquisa

O estudo e a análise dos casos ilustrados e de outros similares permitiram formular as seguintes considerações:

- 1) quando está se avançando a escavação em condições elasto-plásticas do maciço, é muito importante não dar tempo para o núcleo se deformar. A este respeito torna-se muito significativo o exemplo do Frejus já citado, em que, num maciço litologicamente homogêneo,



a paralização do avanço da frente num meio solicitado em campo elasto-plástico resultou, quando da retomada do serviço - após 3 meses de paralização - num acentuado incremento dos fenômenos de extrusão de pré-convergência e, finalmente, de convergência na cavidade.

Com o prosseguimento dos serviços estes fenômenos voltaram rapidamente a apresentar os mesmos valores das medidas anteriores.

Esta circunstância mostra que, mantendo uma cadência de escavação suficientemente rápida e constante, é possível evitar que se produzam fenômenos de extrusão e pré-convergência, que são causas determinantes dos subsequentes fenômenos de convergência da cavidade.

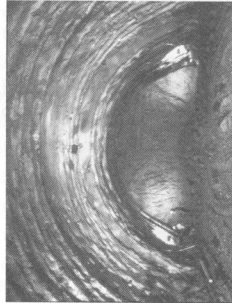
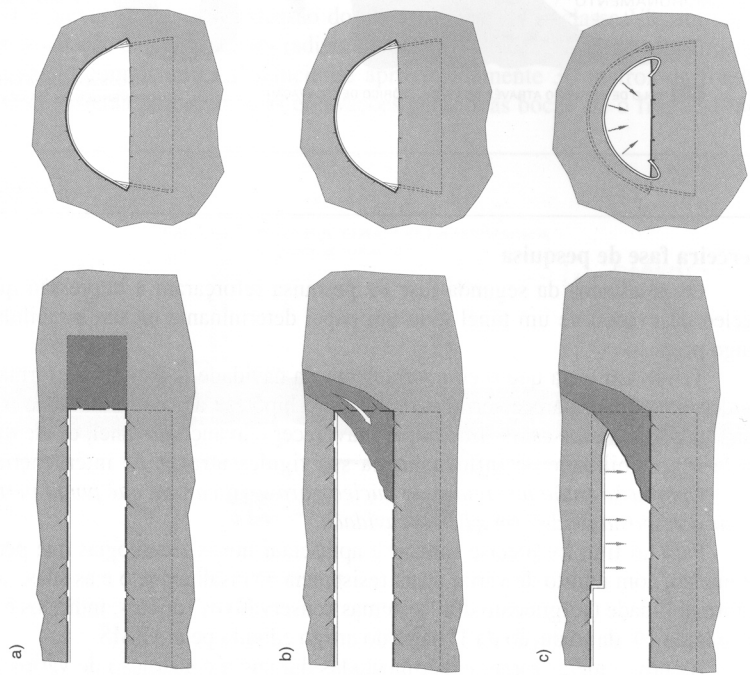
- 2) o desmoronamento do núcleo e o colapso da cavidade nunca se produzem independentemente e, de modo peculiar, sem que o primeiro anteceda o segundo. Tal circunstância - observada frequentemente durante a construção de numerosos túneis - além dos citados nos casos ilustrados anteriormente, põe incontestavelmente em evidência (fig. 7):
 - i) a existência de uma estreita correlação entre o fenômeno de extrusão do núcleo de frente de avanço e os fenômenos de pré-convergência e convergência;
 - ii) a existência de uma estreita correlação entre desmoronamento do núcleo e o colapso da cavidade, inclusive mesmo em trecho já estabilizado;
 - iii) que os fenômenos de deformação na cavidade são sempre cronologicamente subsequentes e dependentes das deformações que envolvem o núcleo da frente de avanço.

As observações feitas na segunda fase de pesquisa põem em evidência também a necessidade de fazer com que o "efeito-arco", cuja formação condiciona a estabilidade do túnel, inicie-se ainda à montante da face de escavação para que continue sendo eficaz numa determinada seção, também depois do afastamento da frente da própria seção.

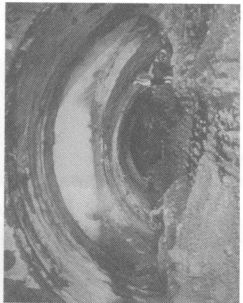
DINÂMICA DAS DEFORMAÇÕES COM AVANÇO EM MEIA SEÇÃO

REAÇÃO

TUNEL TASSO

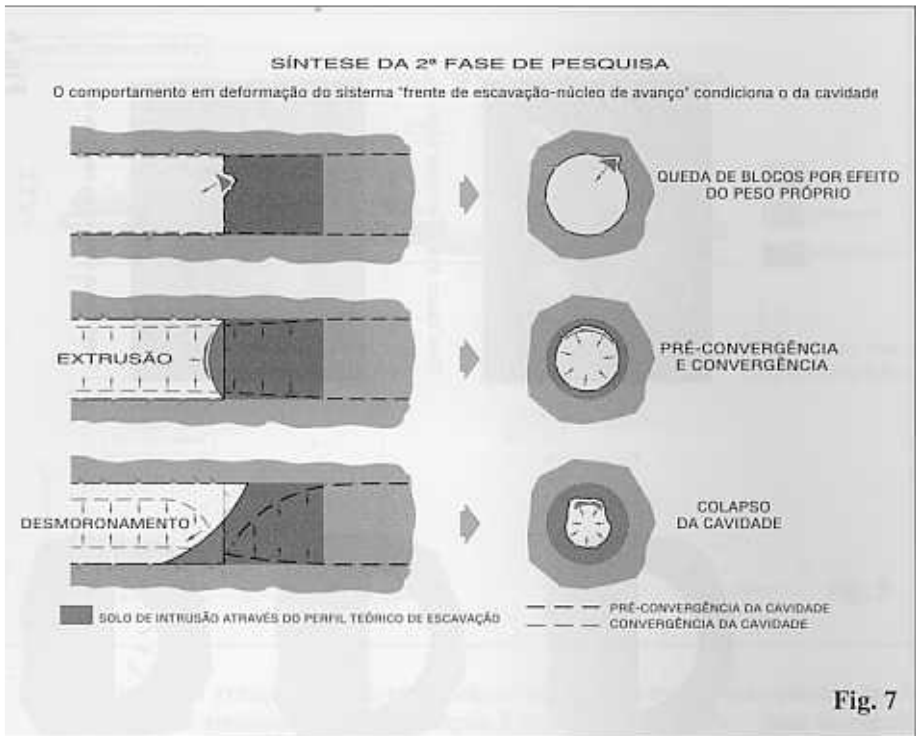


Túnel Tasso: Avanço em meia seção (a)



Túnel Tasso: Colapso da cavidade (c)

Fig. 6



Terceira fase de pesquisa

Os resultados da segunda fase de pesquisa reforçaram a impressão que a rigidez do núcleo de avanço de um túnel teria um papel determinante na sua estabilidade a curto e a longo prazo.

Tendo em vista que o comportamento da cavidade respondia de forma subsequente à rigidez do núcleo, parece ser lógico ter como hipótese a possibilidade de utilizar o núcleo como *instrumento de estabilização* para favorecer o avanço do túnel, desde que fosse confirmada a possibilidade de influenciar na sua rigidez através de intervenções apropriadas.

Operou-se então na rigidez do núcleo para verificar até que ponto permitir-se-ia controlar a resposta de deformação da cavidade.

Para tal fim, foi preciso estudar e apresentar novas tecnologias que permitissem atuar no núcleo, com intuito de variar a sua resistência ao cisalhamento e as suas características de deformabilidade (surgimento dos "sistemas conservativos" diretos, indiretos e mistos; ver fig. 15, página 19, da tradução da 1ª parte do artigo editado pela ABMS).

As novas idéias foram experimentadas durante a construção de vários túneis, em difíceis condições de tensão-deformação. Será abordado a seguir especificamente, o que foi feito numa obra experimental especialmente significativa.

Exemplo do túnel San Vitale (1991)

O túnel San Vitale, de 4.200 metros de extensão e com cobertura variável até 150 m, faz parte do projeto de duplicação da linha férrea Caserta-Foggia.

O traçado percorre uma região de maciços pertencentes a duas unidades lito-estratigráficas: unidade de “Altavilla” e unidade das argilas “Varicolori” (ver perfil na fig. 8).

A unidade de “Altavilla”, medianamente tectonizada, é constituída de alternância de níveis de areias, às vezes até pouco cimentadas, e lentes de argilas, argilas margosas e siltosas.

A unidade subjacente de argilas “Varicolori” é constituída de dois diferentes “litotipos”: um predominantemente argiloso-margoso, o outro de predominância calcário-margoso. Ambos sofreram intensa tectonização, que lhes conferiu uma estrutura escamosa desordenada e caótica, tornando-os extremamente alteráveis e causando um microfraturamento dos elementos litóides mais competentes. Estes atualmente se encontram em forma de blocos amontoados e isolados, imersos numa matriz argilosa ou argilo-margosa e não em camadas contínuas como provavelmente eram em suas origens. O maciço apresenta-se transformado em diminutos fragmentos que tendem a lhe conferir o comportamento de um material solto, contendo conchas de material lapídeo dobrado pelas forças tectônicas e espalhado na matriz argilosa. A estrutura escamosa (com espessura decimétrica a milimétrica) torna esse material fortemente sensível à umidade do ar.

Breve histórico da obra

A escavação do túnel iniciou-se em março 1986. O projeto original era baseado nos conceitos do NATM e previa para toda a extensão do túnel escavação em classe Vb, em seção parcializada com instalação de chumbadores radiais ativos junto a face. O anel de revestimento primário estava sendo completado a distância de aproximadamente 30 metros da frente.

Baseado neste sistema procedeu-se as escavações pelas duas bocas até o fim de 1988,

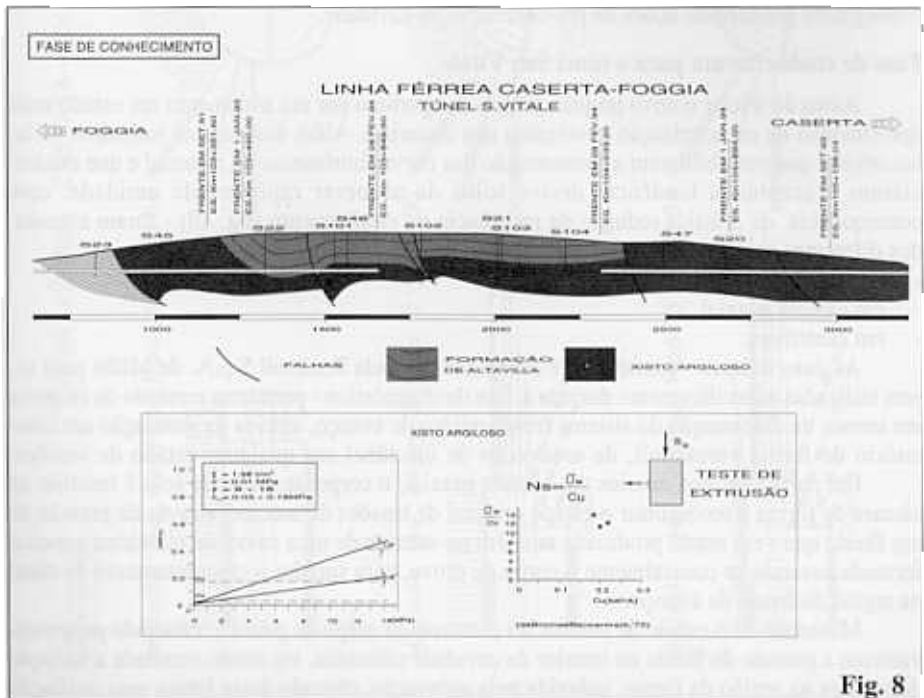


Fig. 8

num maciço caracterizado pela presença de facies-margosa-arenosa da unidade de “Altavilla”, com coberturas da ordem de 30 a 40 m.

Como evidenciado na fig. 9 o método de avanço não previa nenhum tipo de contenção da frente. Conseqüentemente, logo que o túnel penetrou nas argilas escamosas “Varicolori” observaram-se vistosos fenômenos de extrusão do núcleo, junto com acentuados fenômenos de pré-convergência que imediatamente se repercutiram à jusante da face de escavação na meia seção, em forma de convergências radiais consideráveis de até 1 m., que acabaram prejudicando completamente a espessura útil do revestimento final, a ponto de paralisar a obra.

Conseqüentemente em 1989, foi elaborado um novo projeto específico para o trecho em argilas escamosas. O avanço estava ainda previsto em meia seção, porém com uso de enfilagens metálicas, tirantes radiais protendidos nas laterais e tubos de “fiberglass” na frente. A execução de um “invert” provisório completaria as intervenções de primeira fase (fig. 9).

Contudo a adoção da pré-consolidação da frente, tendo sido concebida e aplicada conforme critérios incorretos, surtiu efeitos ineficazes e até desastrosos, quer com relação à produtividade (apenas 80 m de avanço em 1 ano), quer com relação à estática. Com efeito, nos curtos trechos escavados aconteceram repetidos desmoronamentos, acentuadas convergências e rupturas de revestimento de 1ª fase.

Durante o ano 1991 houve a paralisação total da obra. O consórcio de empreiteiras de acordo com a contratante (Ferrovie dello Stato) resolveu encomendar um novo projeto à Rocksoil S.p.A. de Milão que - baseado nas orientações obtidas do programa de pesquisa até então realizado - resolveu desconsiderar totalmente todos os projetos anteriores para adotar nos 1800 m remanescentes de túnel, um novo critério de avanço baseado no princípio do controle dos fenômenos de deformação através do enrijecimento do núcleo da frente, e por conseguinte produzindo ações de pré-contenção na cavidade.

Fase de conhecimento para o túnel San Vitale

Antes de iniciar o novo projeto, julgou-se oportuno por em andamento um estudo mais aprofundado de caracterização geotécnica dos materiais. Além dos ensaios rotineiros de laboratório - que possibilitaram a reconstrução das curvas intrínsecas do material e que evidenciaram a acentuada tendência destes solos de absorver rapidamente umidade, com consequência de drástica redução da resistência ao cisalhamento (fig. 10) - foram executados diferentes ensaios de extrusão, a saber:

- a velocidade constante,
- em câmara triaxial,
- em centrífuga.

As duas últimas - concebidas e desenvolvidas pela Rocksoil S.p.A. de Milão para serem utilizadas especificamente durante a fase de diagnóstico - permitem o estudo de resposta em termos de deformação do sistema frente-núcleo de avanço, através da simulação em laboratório de forma verossímil, da escavação de um túnel em qualquer estado de tensões.

Em particular, nos ensaios em câmara triaxial, o corpo de prova de solo é inserido na câmara de forma a reconstituir o estado original de tensões do maciço, através da pressão de um fluido que vem sendo produzido também no interior de uma cavidade cilíndrica especial formada cavando-se coaxialmente o corpo de prova, para simular o comportamento do túnel na região da frente de avanço.

Mantendo-se o estado de tensões no contorno do corpo de prova e reduzindo progressivamente a pressão do fluido no interior da cavidade cilíndrica, vai sendo simulada a variação de tensões na região da frente, induzida pela escavação, obtendo desta forma uma avaliação

LINHA FÉRREA CASERTA-FOGGIA - TÚNEL SAN VITALE

FASE DE TERAPIA

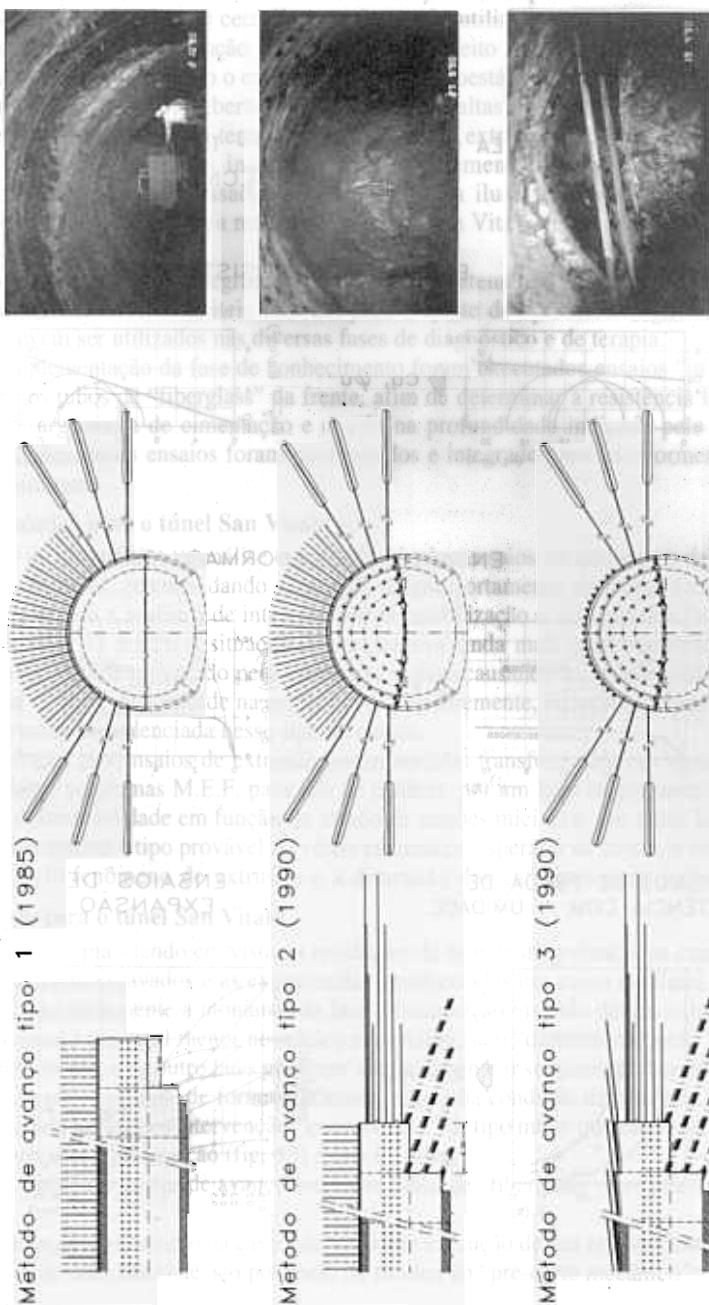
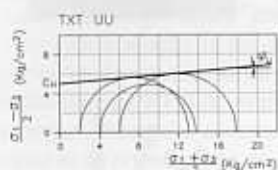


Fig. 9

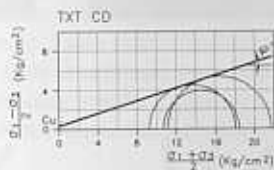
FASE DE
CONHECIMENTO

LINHA FÉRREA CASERTA-FOGGIA - TÚNEL SAN VITALE
ENSAIOS GEOTÉCNICOS

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

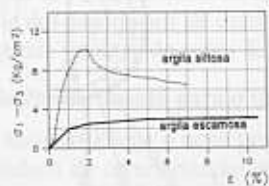


c_u, φ_u

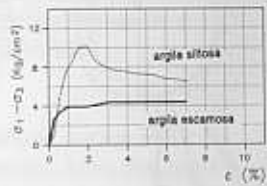


c', φ'

ENSAIOS DE DEFORMABILIDADE

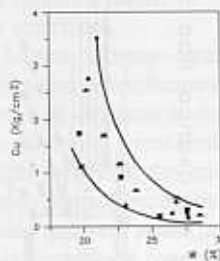


E_u



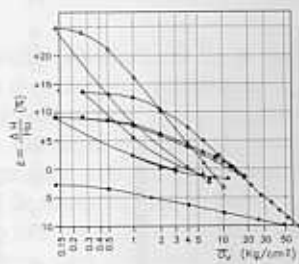
E'

ENSAIOS DE PERDA DE
RESISTÊNCIA COM A UMIDADE



$c_u = f(w)$

ENSAIOS DE
EXPANSÃO



$K_o, O.C.R.$

Fig.10

da dimensão do fenômeno de extrusão na frente em função do tempo.

Os ensaios de extrusão em centrífuga estão sendo utilizados especialmente quando for necessário tomar em consideração cuidadosamente o efeito da gravidade. Eles permitem de um lado tomar em consideração o efeito das pressões geostáticas atuando no contorno da cavidade, também no caso de coberturas medianamente altas; de outro lado acompanhar cuidadosamente o andamento no tempo do fenômeno de extrusão, mediante transdutores de pressão e de deslocamentos inseridos convenientemente no interior do modelo.

O leitor que estiver interessado achará uma ampla ilustração sobre os ensaios de extrusão em centrífuga feitos para a realização do túnel San Vitale, na referência [10] relacionada na bibliografia.

Os ensaios de extrusão, integrados com modelos matemáticos simples de elementos finitos, tornam-se extremamente úteis também para o ajuste dos parâmetros geomecânicos (c , ϕ , E) que devem ser utilizados nas diversas fases de diagnóstico e de terapia.

Para complementação da fase de conhecimento foram executados ensaios "in situ" de arrancamento dos tubos de "fiberglass" da frente, afim de determinar a resistência limite de aderência entre argamassa de cimentação e o solo na profundidade indicada pelo projeto.

Os resultados destes ensaios foram confrontados e integrados aos anteriormente obtidos em solos similares.

Fase de diagnóstico para o túnel San Vitale

Em fase de diagnóstico, a análise dos resultados dos ensaios de extrusão e das curvas características do túnel, estavam dando indicação de comportamento de frente indubitavelmente instável, devido a ausência de intervenções de estabilização e controle dos fenômenos de deformação (fig. 11 e 12). A situação se apresentava ainda mais comprometida, pois o afrouxamento do maciço provocado pela escavação, estava causando no contorno da cavidade, uma rápida variação da umidade na argila e, conseqüentemente, redução do fator de estabilidade à extrusão, já evidenciada nesse tipo de ensaio.

Os resultados dos ensaios de extrusão foram também transformados em modelos numéricos, mediante programas M.E.F. para fim de calibrar, por um lado os parâmetros de resistência e de deformabilidade em função do estado de tensões iniciais e, por outro lado, para avaliar qualitativamente o tipo provável de efeito cinemático esperado na frente, o volume de solo atingido pelo fenômeno de extrusão e a dimensão dos carregamentos mobilizados.

Fase de terapia para o túnel San Vitale

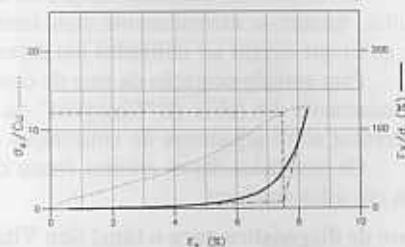
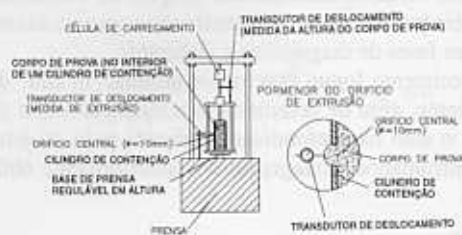
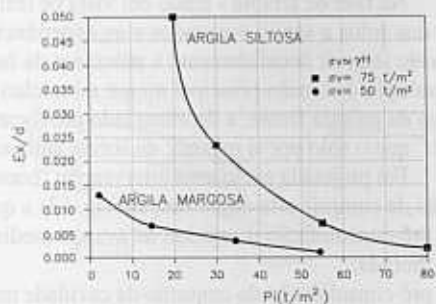
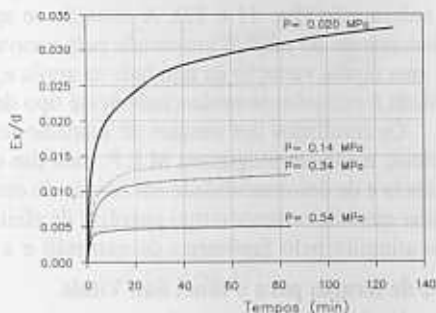
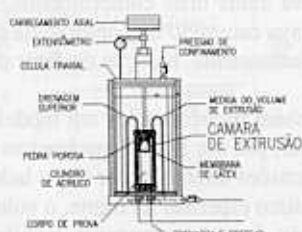
Na fase de terapia - tendo em vista os resultados da fase de diagnóstico, as características dos solos a serem escavados e as experiências amadurecidas em casos similares - foi resolvido intervir decididamente à montante da face de escavação visando de um lado impedir a anulação da tensão principal menor no núcleo e, portanto, sem "distensionamento" no contorno da própria frente, e de outro lado provocar artificialmente o surgimento daquele "efeito arco" que o solo por si mesmo, de forma autônoma, não tinha condição de produzir.

Foi projetada então uma intervenção "conservativa" de tipo misto que estivesse em condição de cumprir esta dupla função (fig. 13) e que incluísse :

- pré-consolidação do núcleo de avanço mediante tubos de "fiberglass" com aderência melhorada;
- pré-consolidação do contorno da cavidade mediante execução de um revestimento de concreto projetado com fibras de aço por meio da técnica do "pré-corte mecânico";
- drenagens;
- arco invertido em concreto armado executado junto à frente.

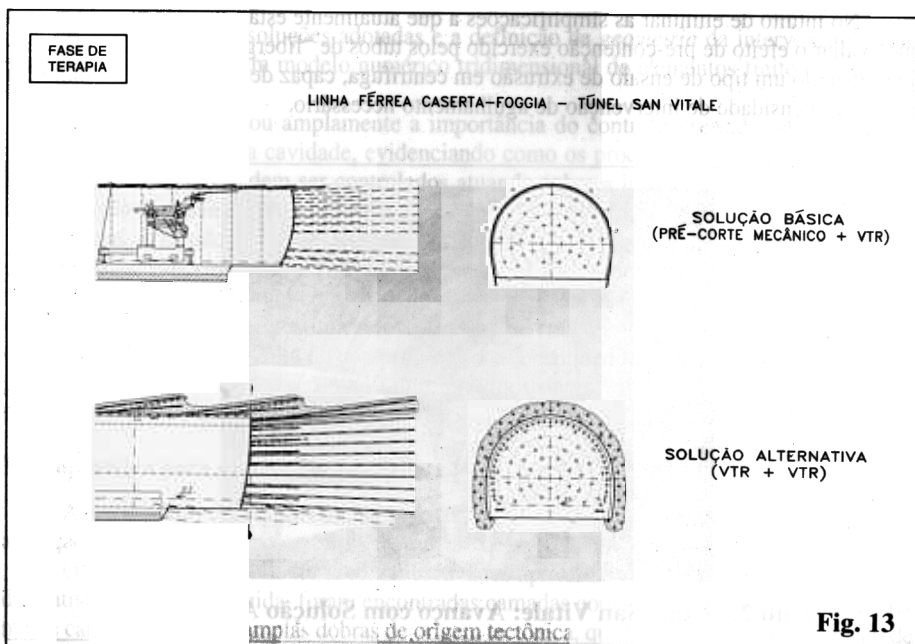
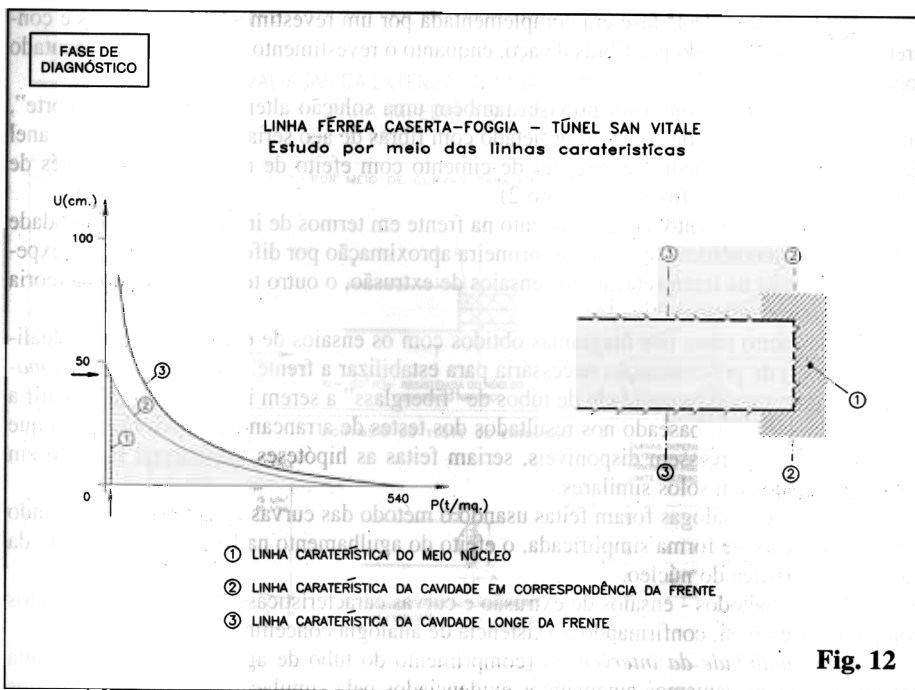
FASE DE
DIAGNÓSTICOLINHA FÉRREA CASERTA-FOGGIA - TÚNEL SAN VITALE
ENSAIOS DE EXTRUSÃO

a - Ensaio de extrusão com velocidade de carregamento controlada

(Broms e Bennermark) $\rightarrow N_s = \frac{\sigma_a}{C_u}$ = coeficiente de estabilidadeb - Ensaio de extrusão em célula triaxial $\rightarrow P_i$ = pressão na câmara de extrusão

$$\sigma_0 = \gamma H$$

Fig. 11



A intervenção de 1ª fase era complementada por um revestimento de cambotas e concreto projetado reforçado por fibras de aço, enquanto o revestimento final ia sendo executado logo em seguida.

No âmbito do projeto foi prevista também uma solução alternativa à do “pré-corte”, em que o revestimento de concreto projetado com fibras de aço seria substituído por um anel de solo consolidado mediante injeções de cimento com efeito de recompressão através de tubos manchetados de “fiberglass” (foto 2).

O dimensionamento do agulhamento na frente em termos de intensidade, profundidade e distribuição geométrica, foi feito em primeira aproximação por diferentes modos: um experimental baseado na interpretação dos ensaios de extrusão, o outro teórico, baseado na teoria das curvas características (fig. 14).

No primeiro caso, nos diagramas obtidos com os ensaios de extrusão, foi individualizada a pressão de pré-contenção necessária para estabilizar a frente. Portanto, *o dimensionamento da intervenção* (quantidade de tubos de “fiberglass” a serem instalados para garantir a pressão), foi avaliado baseado nos resultados dos testes de arrancamento. Nos casos em que estes dados não estivessem disponíveis, seriam feitas as hipóteses admissíveis baseado em testes executados em solos similares.

Avaliações análogas foram feitas usando o método das curvas características, tomando em consideração, de forma simplificada, o efeito do agulhamento na frente para o cálculo da curva característica do núcleo.

Os dois métodos - ensaios de extrusão e curvas características - forneceram resultados comparáveis entre si, confirmando a existência de analogia conceitual.

A *profundidade da intervenção* (comprimento do tubo de agulhamento) foi definida em função dos mecanismos cinemáticos evidenciados pela simulação numérica dos ensaios de extrusão.

No intuito de eliminar as simplificações a que atualmente estão sujeitos quando se tem que avaliar o efeito de pré-contenção exercido pelos tubos de “fiberglass” na frente, está sendo preparado um tipo de ensaio de extrusão em centrífuga, capaz de fornecer uma estimativa direta da intensidade de intervenção de agulhamento necessário.

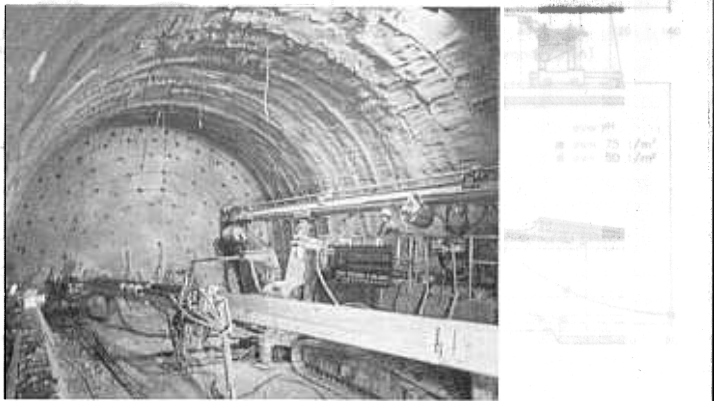


Foto 2 - Túnel San Vitale: Avanço com Solução Alternativa

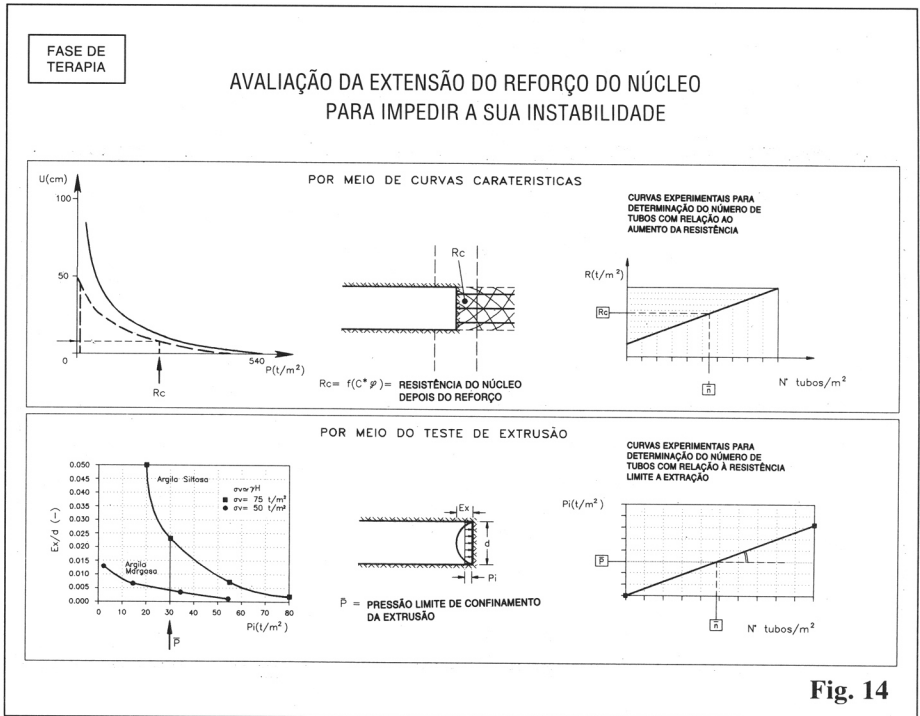


Fig. 14

A verificação das soluções adotadas e a definição da *geometria* da intervenção foram analisadas por meio de um modelo numérico tridimensional de elementos finitos em campo não linear (fig. 15 e 16).

O modelo confirmou amplamente a importância do controle exercido pelo núcleo de avanço na estabilidade da cavidade, evidenciando como os processos cinemáticos induzidos em fase de escavação podem ser controlados atuando sobre a intensidade de intervenção de consolidação no núcleo.

Afinal, o estudo da terapia pôs em evidência a necessidade, para a solução básica, de pré-consolidar o núcleo de avanço com aproximadamente 50 tubos de “fiberglass” de diâmetro externo/interno 40/10 mm com 18 m de comprimento. Para a solução alternativa, confirmou-se a possibilidade de substituir o revestimento de concreto projetado do sistema de “pré-corte” por uma coroa em volta do contorno de solo consolidado mediante 49 tubos de “fiberglass”, diâmetro externo/interno 60/40 mm, providos de válvulas manchetes para execução de injeções de recompressão.

Fase operativa para o túnel San Vitale

Animados pelo êxito das verificações feitas mediante cálculo numérico, prosseguiu-se com a aplicação prática das intervenções escolhidas em fase de projeto no âmbito das seções típicas (fig. 13).

Os primeiros 300 m de túnel foram escavados aplicando a solução básica, com resultados satisfatórios. Em seguida, foram encontradas camadas consistentes de calcário, frequentemente caracterizadas por amplas dobras de origem tectônica, que tornaram difícil a operação de

FASE DE
TERAPIALINHA FÉRREA CASERTA-FOGGIA
TÚNEL SAN VITALE

- GEOMETRIA E ESTADO DE TENSÕES REAIS
- DIMENSIONAMENTO DAS CONSOLIDAÇÕES, PRÉ-REVESTIMENTO, REVESTIMENTO FINAL
- VERIFICAÇÃO DO REFORÇO DO NÚCLEO
- SIMULAÇÃO DO RITMO OPERACIONAL

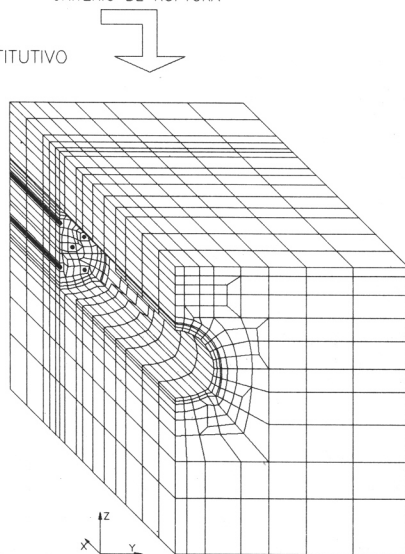
AFERIÇÃO DO MODELO:

a) DE FASE DE CONHECIMENTO:

C, ϕ, E
 C_u, ϕ_u, E_u
 $\gamma, \gamma', \gamma_{sat}$

MODELO CONSTITUTIVO

CRITÉRIO DE RUPTURA



b) DE FASE DE DIAGNÓSTICO:

TIPOLOGIA DAS INTERVENÇÕES
 DE CONSOLIDAÇÃO,
 DE PRÉ-CONFINAMENTO
 E DE CONFINAMENTO

c) DE CONSIDERAÇÕES
ANTECEDENTES DE
TERAPIA:

NÚMERO E COMPRIMENTO
 DOS TUBOS NA
 FRENTE DE CORTE

Fig. 15

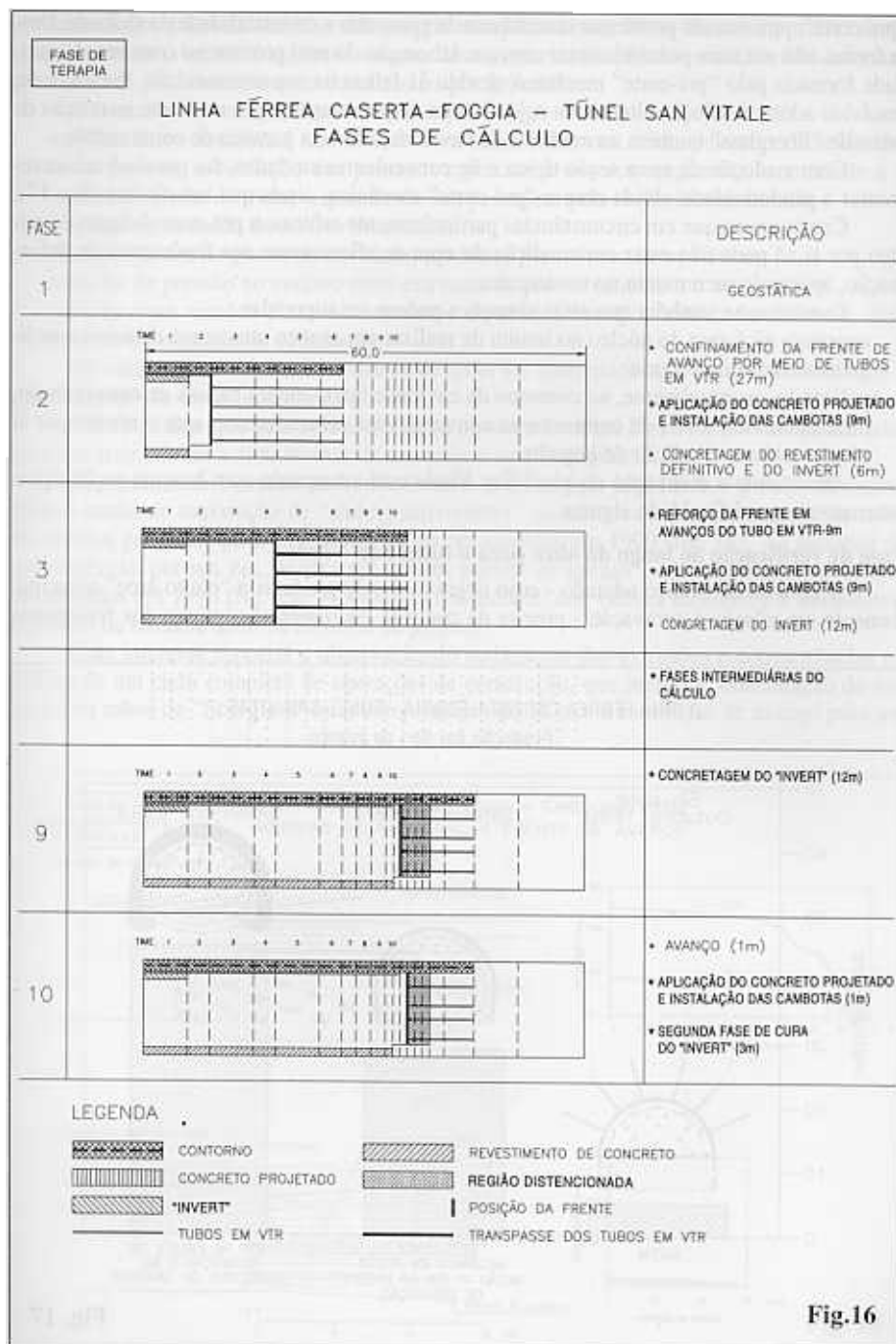


Fig.16

“pré-corte”, provocando problemas inaceitáveis de geometria e de estabilidade da abóbada. Desta forma, não era mais possível contar com a colaboração do anel protetor no contorno da cavidade formado pelo “pré-corte” mecânico, devido às falhas na sua continuidade. Portanto, foi resolvido adotar a solução alternativa cujo sistema de pré-consolidação mediante instalação de tubos de “fiberglass” também no contorno da cavidade, oferecia garantia de continuidade.

Com a adoção da nova seção típica e de convenientes cuidados, foi possível até incrementar a produtividade obtida com o “pré-corte” mecânico, ainda que satisfatória (fig. 17).

Constatou-se que em circunstâncias particularmente críticas, a pré-consolidação do núcleo por si só pode não estar em condição de opor-se eficazmente aos fenômenos de deformação, apesar do incremento no tratamento.

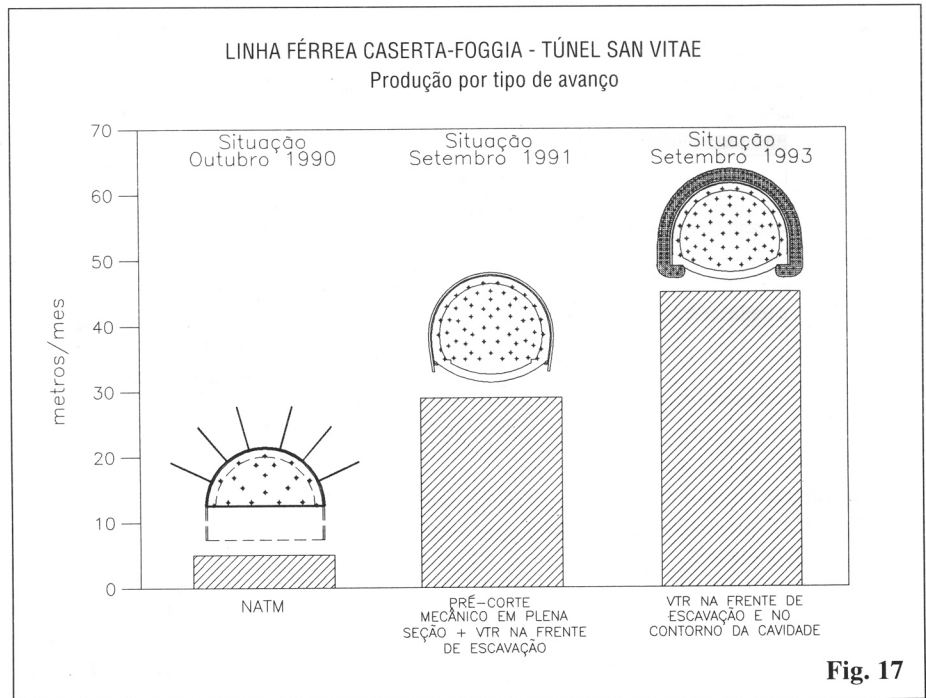
Constatou-se também que estas situações podem ser superadas :

- operando na *forma* do núcleo no intuito de realizar em avanço uma coroa de solo consolidado ao redor do próprio;
- aplicando, eventualmente, no contorno da cavidade intervenções radiais de consolidação, dimensionadas, a fim de contrastar as convergências remanescentes que o núcleo por si só não está em condição de impedir.

Atualmente a escavação do túnel San Vitale está avançando com base na seção típica alternativa, sem dificuldade alguma.

Fase de verificação ao longo da obra para o túnel San Vitale

O sistema de avanço adotado - cujo objetivo é o de produzir o “efeito-arco” antecipadamente em relação à escavação - precisa de controle instrumental contínuo dos fenômenos



de deformação, a fim de verificar seu próprio comportamento. Desta forma, é possível fazer oportunamente o acerto do próprio sistema de avanço em função da evolução das deformações causada pelas intervenções de estabilização aplicadas.

O controle instrumental inclui a execução de:

- medidas extensiométricas nos trechos com baixa cobertura, feitas pela superfície de forma a detectar a evolução das pré-convergências e das convergências à montante e à jusante da frente de avanço, quando da sua passagem pela seção instrumentada;
- medidas de extrusão do núcleo de avanço;
- medidas de convergência da cavidade, mediante fita métrica de aço invar;
- medidas de pressão no contato entre estrutura de pré-revestimento e maciço;
- medidas com macaco plano no intradorso do revestimento definitivo de concreto, afim de obter-se o estado de sollicitação.

Obviamente estes controles básicos deverão ser integrados com outros, toda vez que a peculiaridade da situação assim exigir.

Cabe ressaltar que pela primeira vez na história, no túnel San Vitale foram executadas *medidas sistemáticas e simultâneas de extrusão e de convergência*.

As medidas de extrusão na frente, levadas a efeito pela I.S.M.E.S. S.p.A. de Bergamo (Itália) mediante introdução de "sliding micrometer" no núcleo de avanço, mostraram valores médios próximos de 2 cm, contra os 20 cm medidos em 1990 (fig. 18). As medidas de convergência, por sua vez, mostraram valores médios de apenas 7 cm contra os mais de 100 cm medidos em 1990 (fig. 19). A significativa redução dos valores medidos é a demonstração certa da eficácia da nova filosofia de projeto.

É de interesse especial a observação do andamento das extrusões e convergências no âmbito de um ciclo completo de operações de construção, que inclui a consolidação do núcleo com tubos de "fiberglass" num comprimento de 18 m e a escavação de avanço para um

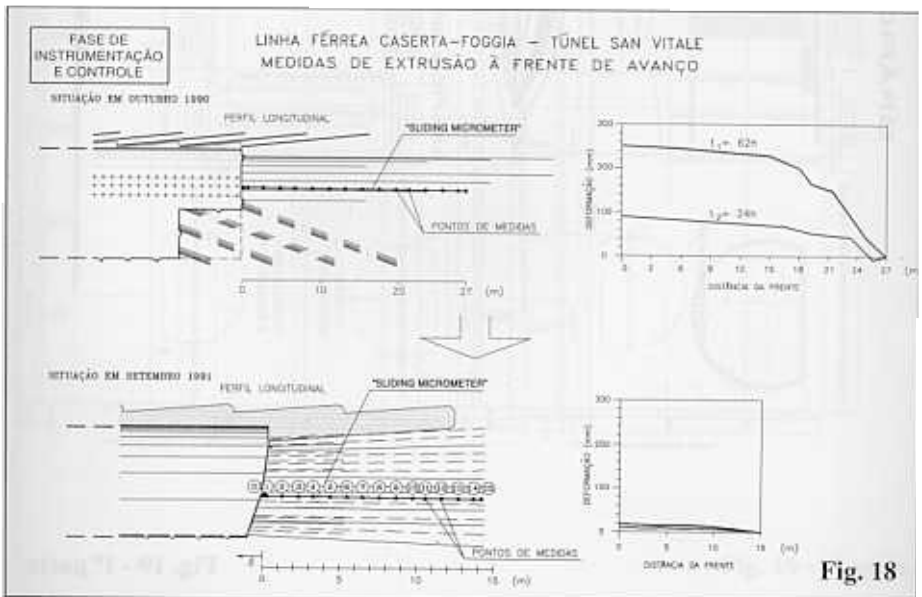
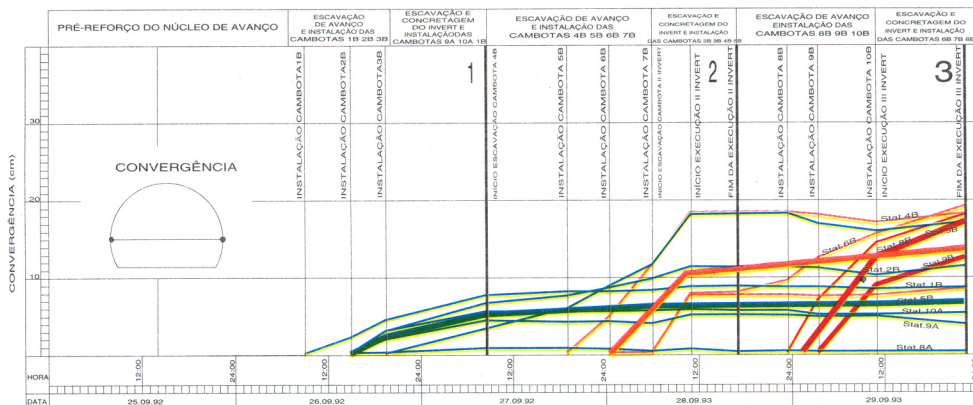


GRÁFICO CONVERGÊNCIA-TEMPO



FASE DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

LUNARDI

GRÁFICO RECALQUE À ESQUERDA-TEMPO

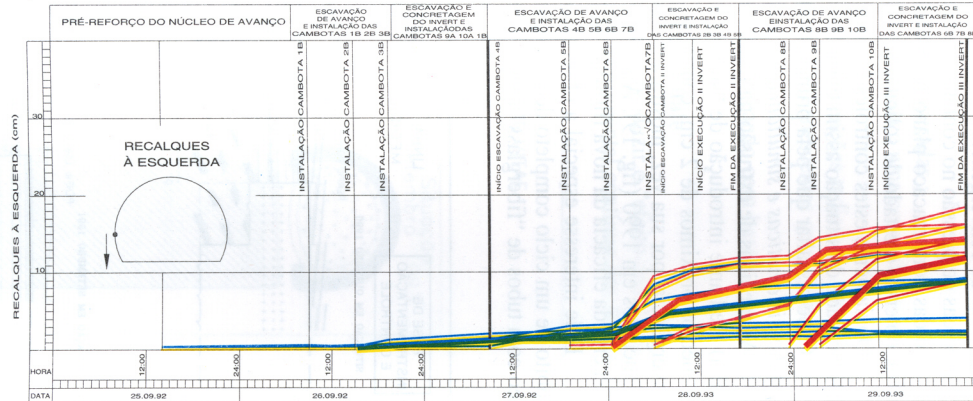
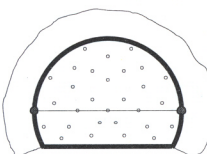
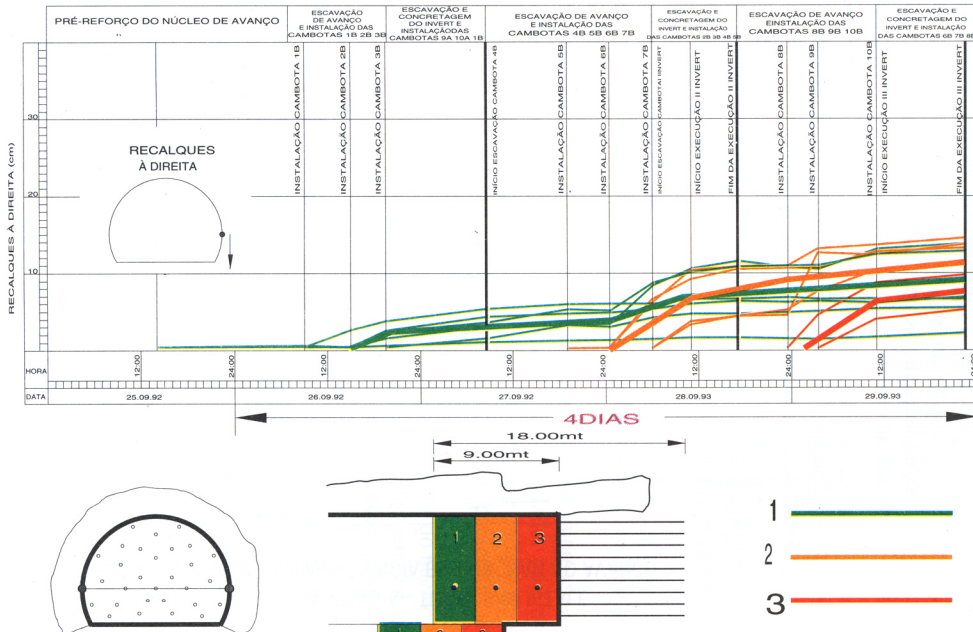


Fig. 19 - 1ª parte

GRÁFICO RECALQUE À DIREITA-TEMPO



- 1
- 2
- 3

Fig. 19 - 2ª parte

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS - MÉTODO ADECO - RS: 2ª PARTE

trecho mínimo de 6 m e máximo de 9 m. A este respeito cabe ressaltar que a definição deste trecho era feita durante o próprio avanço em função da evolução e da magnitude das convergências na cavidade, que não deveriam superar o limite estabelecido pelo projetista, a fim de manter a resposta de deformação tanto quanto possível em campo elástico.

A leitura dos diagramas extrusão-convergência mostrada na fig. 20 - referente a um trecho do túnel atravessando um maciço particularmente ruim - põe em evidência como a redução do comprimento da consolidação do núcleo devido ao avanço da frente, de 18 m iniciais para 10,50 m - o que reduz também a sua rigidez média - faz com que o comportamento em termos de deformação do núcleo (extrusão) e da cavidade (convergência), passe progressivamente do campo elástico para o campo elasto-plástico. Em detalhe, as curvas de convergência que inicialmente mostravam um andamento típico de uma situação favorável atingindo rapidamente a estabilidade, vão assumindo gradativamente um andamento que manifesta progressiva dificuldade na estabilização dos fenômenos de deformação.

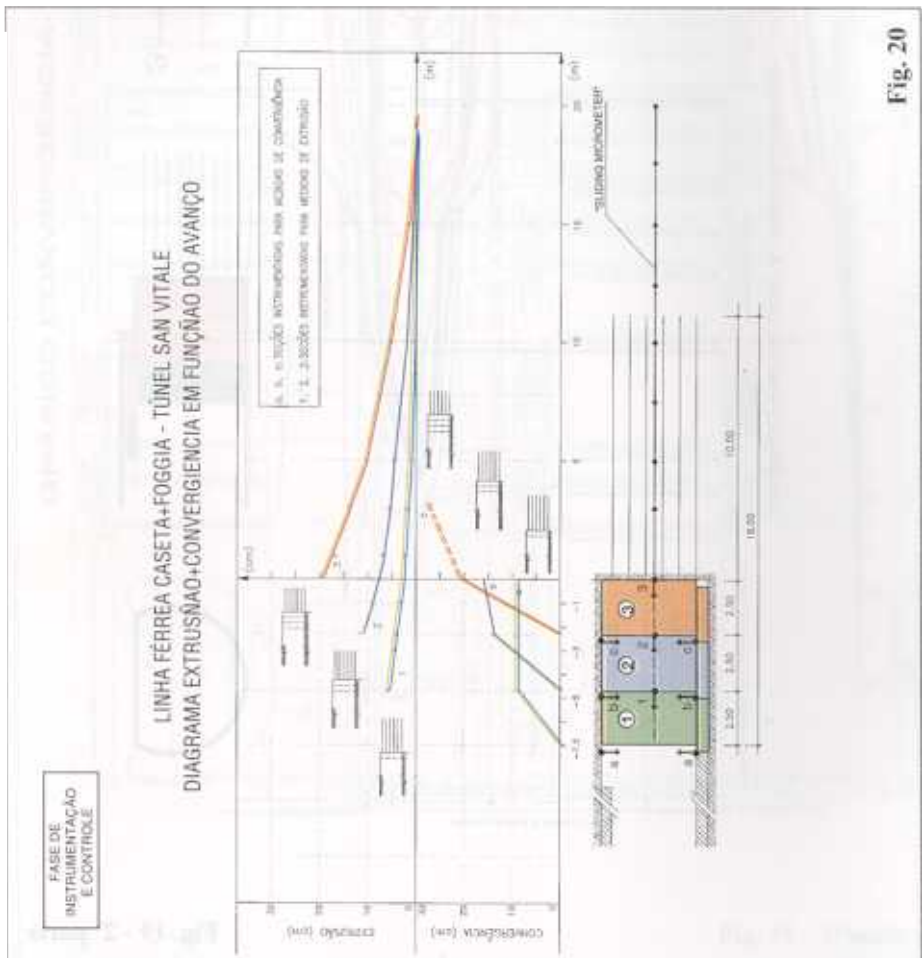


Fig. 20

A convergência na cavidade, portanto, torna-se neste enfoque, sinal muito importante para o projetista, no intuito de determinar o momento em que precisa paralisar o avanço para executar uma nova consolidação, de forma a restabelecer o comprimento mínimo do núcleo consolidado para que o maciço seja mantido em campo elástico.

Resultados da terceira fase de pesquisa

Os estudos e as experimentações levadas a cabo no túnel San Vitale evidenciaram a existência de uma estreita ligação entre as manifestações de deformação que ocorreram no interior do núcleo de avanço do túnel (extrusões) e as que se desenvolveram em seguida, no contorno da cavidade, à jusante da face de escavação (convergências). Também mostraram, de outro lado, que as manifestações de deformação na cavidade podem ser ajustadas e sensivelmente reduzidas, controlando-se artificialmente a deformabilidade do núcleo de avanço e, portanto, a sua rigidez (contenção das extrusões).

Isto é possível mediante a execução de adequadas intervenções de estabilização, dimensionadas e distribuídas no núcleo de avanço e no contorno da cavidade, em função das características de resistência e de deformabilidade do maciço em relação à situação existente de tensões.

A respeito disto, no caso de maciço solicitado *em campo elasto-plástico* :

- se o estado de tensões comparado com as características do maciço for baixo, pode até ser suficiente agir apenas na cavidade com intervenções radiais, evitando qualquer intervenção de tipo longitudinal no núcleo de avanço.
- se o estado de tensões for elevado será preciso, pelo contrário, agir principalmente no próprio núcleo, consolidando-o através de intervenções longitudinais, evitando totalmente as radiais à jusante da face de escavação.

No caso de maciço solicitado *em campo de ruptura*, torna-se imprescindível enrijecer o núcleo de avanço com intervenções de contenção da cavidade, podendo vir a ser complementada com intervenções adequadas de contenção à jusante da face de escavação. A respeito disso, as experiências levadas a efeito - e as ilustradas nos parágrafos anteriores são especialmente significativas e sugerem o seguinte (fig. 21):

- operar à montante da face de escavação sobre *a forma e o volume* do núcleo, por meio da realização de uma coroa de solo consolidado ao redor do núcleo para proteção do mesmo. Inclusive durante a execução do túnel San Vitale foi constatado ser eficaz operar deste modo para superar trechos particularmente difíceis.
- se tais providências resultarem insuficientes, executar posteriormente intervenções radiais de consolidação no contorno da cavidade, dimensionadas para contrastar as convergências remanescentes que o núcleo sozinho, apesar de enrijecido, não tiver condição de impedir.

Neste último caso a distribuição das intervenções entre núcleo e cavidade prevista no projeto, poderá ficar sujeita a ajuste no decorrer da obra.

O núcleo de avanço como instrumento de estabilização

Em síntese, os resultados da pesquisa podem ser resumidos do seguinte modo:

- na "primeira fase de pesquisa" foram identificadas três "*tipologias fundamentais de deformação*" (extrusão na frente, pré-convergência e convergência) e as manifestações de instabilidade delas oriundas (quedas por gravidade, deslocamentos, desmoroamento da frente e da cavidade);
- na "segunda fase de pesquisa" foram obtidas as confirmações experimentais de que todos os fenômenos de deformação (extrusão na frente, pré-convergência e convergência) e as manifestações de instabilidade que podem ser constatadas no interior da cavidade e delas oriundas (queda por gravidade, deslocamento, desmoroamento da frente e colapso de

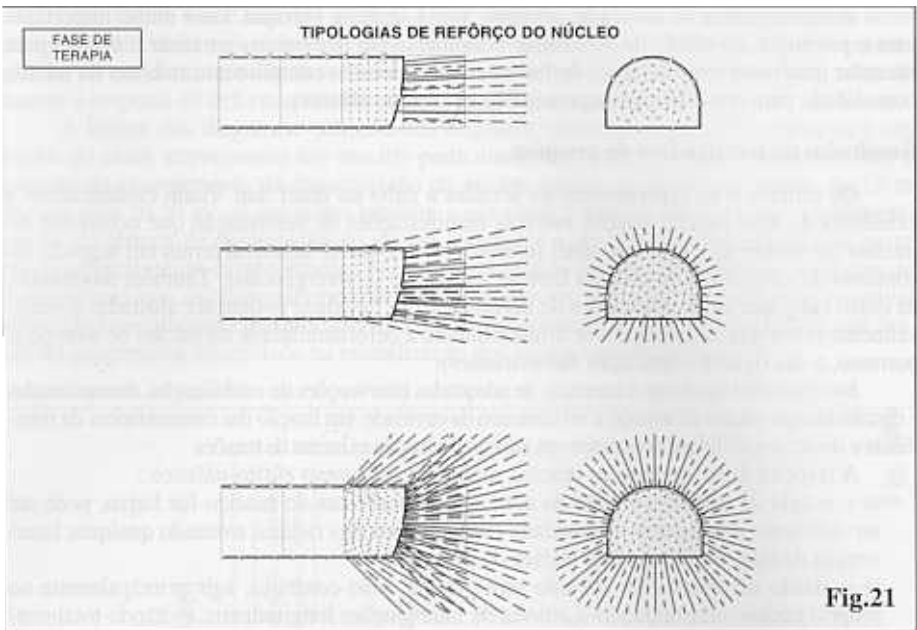


Fig.21

cavidade), dependem direta ou indiretamente da *rigidez do núcleo de avanço*.

na “terceira fase de pesquisa” foi experimentado como seria possível utilizar o *núcleo de avanço como instrumento de estabilização*, agindo artificialmente na rigidez do próprio núcleo, a fim de controlar os fenômenos de deformação na cavidade.

De outra parte, os resultados obtidos pela pesquisa :

confirmam que a resposta em termos de deformação do maciço à ação da escavação deve ser considerada como ponto de referência principal para o projetista de túneis, inclusive porque ela oferece indicação do começo da formação do “efeito-arco” e também do seu posicionamento em relação ao contorno de escavação, ou em outras palavras, da condição de estabilidade alcançada pelo túnel;

ressaltam a importância de manter sob controle a resposta em termos de deformação do sistema frente-núcleo de avanço e de não limitar o controle apenas à cavidade pois, como já se viu, a magnitude das cargas atuantes a longo prazo sobre o revestimento depende da rigidez do núcleo também;

põem em evidência que a resposta de deformação se instaura à montante da face, no entorno do núcleo de avanço, e se desenvolve também à jusante da própria face, ao longo da cavidade; mostram clara indicação da existência de uma ligação direta entre a resposta de deformação do sistema frente-núcleo de avanço e a da cavidade, no sentido que a segunda é direta consequência da primeira;

demonstram que atuando sobre a rigidez do núcleo de avanço mediante intervenções de proteção e de reforço é possível controlar sua deformabilidade (extrusão, pré-convergência), controlando consequentemente também a resposta em termos de deformação da cavidade (convergência).

Enfim, os resultados da pesquisa permitem considerar o núcleo de avanço como um

novo instrumento de estabilização a curto e a longo prazo para a cavidade. Um instrumento cuja resistência e deformabilidade têm uma função determinante, na medida em que são capazes de condicionar o aspecto que mais deve preocupar o projetista de túneis : *o comportamento da cavidade* quando da chegada da frente de avanço.

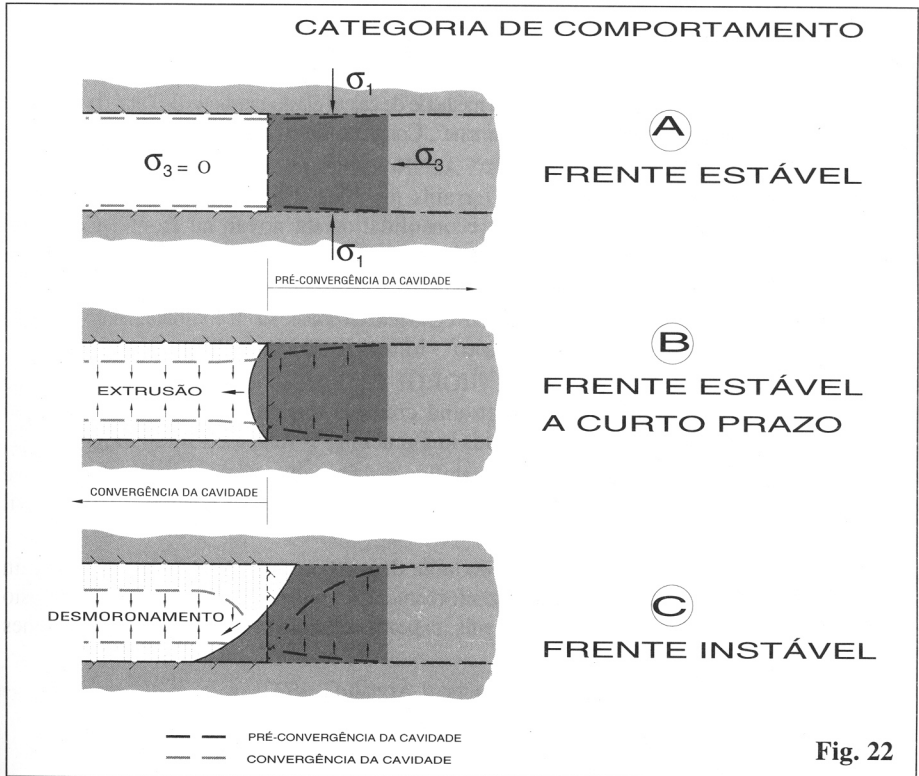
Por este motivo, pode-se afirmar que o projetista de túneis - para estar em condição de preparar um projeto que garanta a estabilidade da obra a curto e longo prazo deverá por toda a sua atenção nos fenômenos de tensão-deformação do sistema frente-núcleo de avanço, ou seja nas suas condições de estabilidade.

Consequentemente, o comportamento do sistema frente-núcleo de avanço pode ser assumido como referência a fim de padronização dos túneis, com a vantagem de constituir-se num parâmetro que mantem sua validade em todos os tipos de maciço e em todas as situações estáticas.

Neste enfoque, as três situações fundamentais de tensão-deformação do sistema frente-núcleo de avanço (já ilustradas na primeira parte desta exposição), determinam também os três possíveis tipos de comportamento da cavidade (fig 22), a saber :

- comportamento de frente estável (categoria de comportamento A);
- comportamento de frente estável a curto prazo (categoria de comportamento B);
- comportamento de frente instável (categoria de comportamento C).

Em situação de frente estável a estabilidade global está praticamente garantida também sem intervenções de estabilização. Para situações B) e C) os resultados das pesquisas estão indicando que para evitar os fenômenos de instabilidade na frente - e portanto na cavidade - à



procura de uma condição de frente estável A), é necessário atuar com intervenções oportunamente distribuídas entre frente e cavidade e dimensionadas de forma adequada à situação real de tensões relacionadas com as características de resistência e deformabilidade do maciço.

Na medida em que o sistema frente/núcleo de avanço representa por um lado o indício do futuro comportamento da cavidade e por outro lado um formidável instrumento de estabilização à disposição do projetista, é imprescindível tirar o máximo proveito dos extraordinários conhecimentos adquiridos para desenvolver um novo critério de projeto e de construção mais de acordo com a realidade, em comparação com as adotadas até o presente momento.

O critério de projeto baseado na análise das deformações controladas em rochas e solos - cujos conceitos irão ser ilustrados na terceira parte desta exposição - representa, neste sentido, uma resposta consequente e inequívoca dos resultados da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] KASTNER H., "Statik des tunnel-und stollenbauses, 1971.
- [2] RABCEWICZ L.V., "The new austrian tunnelling method", Water Power, 1969.
- [3] TAMEZ E., "Estabilidad de tuneles excavados en suelos", Conferenza presso la Mexican Engineering Academy, Messico 1984.
- [4] KOVARIK., "On the existence of the NATM: erroneus concepts behind the new austrian tunnelling method", Tunnel, 1/1994.
- [5] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione dell'approccio ADECO-RS", ISMES - Programma di istruzione permanente - Bergamo, 14-16 novembre 1988.
- [6] LOMBARDI G., AMBERG W. A., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", Congresso Internazionale ISRM, Denver, 1974.
- [7] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles orientations pour le project et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le preconfinement de la cavite et la preconsolidation du noyau au front", Colloquio Internazionale su "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989.
- [8] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991.
- [9] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling" - Acapulco 16-20 Maggio 1992.
- [10] LUNARDI P., "Glass-resin tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils", SAIE : Seminario su "The application of fiber reinforced plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993.
- [11] LUNARDI P., "La stabilite du front de taille dans les ouvrages souterraines en terrain meuble etudes et experiences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposio Internazionale su "Renforcement des sols: experimentations en vraie grandeur des annes 80", Parigi, 18 novembre 1993.
- [12] AUTOSTRADE S.p.A., "Norme Tecniche d'Appalto", 1992.
- [13] ITALFERRIS T.A.V. S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992.
- [14] A. N. A. S., "Capitolato Speciale d'Appalto, Parte II: Norme Tecniche", 1993.

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SEGUNDO O MÉTODO BASEADO NAS ANÁLISES DAS DEFORMAÇÕES CONTROLADAS NAS ROCHAS E NOS SOLOS*

Prof. Ing. Pietro Lunardi
Universidade de Parma
Rocksoil S.p.A., Milão, Itália

Terceira parte

Proposta do novo critério de projeto

Premissa

Do quanto exposto nas duas primeiras partes desse tratado, publicadas pela ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos [1] [2], emerge que no curso destes últimos anos aconteceram algumas importantes novidades no que diz respeito a projeção e construção de obras subterrâneas.

Podemos resumi-los em três pontos:

1. o reconhecimento da importância da rigidez do núcleo relativa ao comportamento tenso-deformativo de um túnel em fase de avanço e os resultados positivos obtidos na utilização do próprio núcleo como instrumento de estabilização eficaz em todos os tipos de terreno;
2. a afirmação do conceito de pré-contenção da cavidade e, em consequência, o acerto de instrumentos de estabilização inovadores capazes de realiza-lo em prática;
3. a consequente possibilidade de afrontar com segurança a realização de túneis em terrenos de qualquer tipo em qualquer contexto e condições de tensão-deformação.

Estas importantes novidades, para serem difundidas e bem aproveitadas, impõem uma atualização contínua de modelos de projeto e construção tradicionais além da criação de um critério de projeto e construção diferente que os considerem devidamente.

Com esse objetivo, para evitar erros que poderiam prejudicar a eficácia do trabalho realizado, antes de iniciar a traduzir em uma proposta de novo critério os recentes conhecimentos adquiridos sobre o tema de projeto e construção de túneis, torna-se indispensável estabelecer as linhas diretrizes que deveriam servir como referência a quem se prepara a projetar e construir uma obra subterrânea.

É razoável afirmar que para projetar e construir corretamente uma obra subterrânea é fundamental:

em fase de projeto:

* Traduzido pelo Eng. Simone Cemin (Rocksoil S.p.A.) do original "Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli - Terza parte: Proposta del nuovo approccio" publicado na revista *Quarry and Construction*, Aprile/1996

- conhecer profundamente o meio no qual se deverá operar, com particular atenção às suas características de resistência e deformabilidade;
- estudar previamente qual será o comportamento tenso-deformativo (resposta em termos de deformação) deste meio à escavação, na ausência de intervenções de estabilização;
- definir o tipo de ação de contenção ou de pré-contenção necessária para regularizar e controlar a resposta em termos de deformação do meio à escavação;
- escolher o tipo de intervenção de estabilização entre aqueles disponíveis atualmente graças à tecnologia, com base nas ações de pré - contenção ou de contenção que os mesmos são em grau de garantir;
- compilar, em função do comportamento previsto do meio à escavação, as seções tipo definindo, além das intervenções de estabilização mais adequadas à situação na qual se deverá operar, fases, cadências e tempo de instalação na obra dos mesmos;
- dimensionar e verificar, através de cálculo matemático, as intervenções pré-escolhidas para obter o comportamento desejado do meio à escavação e o necessário coeficiente de segurança da obra;

em fase de construção:

- verificar, ao longo da obra, que o comportamento do meio à escavação seja correspondente ao calculado por via analítica em fase de projeto. Proceder então ao acerto do projeto balanceando o peso das intervenções entre a frente e o perímetro da cavidade.

Resulta que o projeto e a construção de uma obra subterrânea devem necessariamente articular-se cronologicamente através de:

1. uma fase de conhecimento, que se refere ao conhecimento geológico, geomecânico e hidrogeológico do meio;
2. uma fase de diagnóstico, que se refere à previsão, por via teórica do comportamento do meio, em termos de resposta de deformação em ausência de intervenções de estabilização;
3. uma fase de terapia, que se refere, inicialmente à definição das modalidades de escavação e estabilização do meio a fim de regularizar a resposta em deformação, e depois à valorização, por via teórica, da eficácia em relação às soluções escolhidas;
4. uma fase de verificação, que se refere ao controle por via experimental do comportamento real do meio à escavação em termos de resposta de deformação para o acerto dos sistemas de escavação e de estabilização.

Para o projeto e a construção de obras subterrâneas, até hoje só existiam dois tipos principais de critério de projeto.

Certos autores haviam proposto alguns esquemas auxiliares ao projetista para projetar obras de estabilização e revestimento de um túnel em base a classificações geomecânicas.

Dentre estes, os mais conhecidos são aqueles elaborados por Bieniawski (R.M.R. System) e por Barton (Q System). Ambos individuam classes geomecânicas com base em uma série de parâmetros geomecânicos e geoestruturais. A cada classe associam as intervenções tipo de estabilização que determinam as seções tipo de projeto. Infelizmente, e esses mesmos autores são os primeiros a se lamentar, foi feito um uso muito diferente desse tipo de classificação, pretendendo a sua utilização como a base de

métodos de projeto e construção completos e não como simples auxílio para o projetista de túneis, como era a idéia inicial desses autores.

Utilizados para uma finalidade diversa daquela para as quais foram criadas, as classificações geomecânicas, e em consequência os métodos de projeto e construção que, como o NATM, a estes se referem, apresentaram notáveis limites.

Existe uma grande dificuldade de aplica-los aos domínios de rochas macias, aos 'flysh' e aos solos. A insuficiente consideração dos efeitos do estado de tensão natural, das dimensões e da geometria de escavação nesses materiais em relação ao comportamento em termos de deformação da cavidade. A desatualização em relação aos sistemas construtivos capazes de propor ações de pré-contenção da cavidade (o jet-grouting horizontal, o pré - corte mecânico, a pré - consolidação do núcleo de avanço mediante instalação de tubos de 'fiberglass', etc) contituem em efeito limites relevantes que tornam esses critérios de projeto e construção inevitavelmente incompletos e não universalmente válidos.

Em alternativa a esse tipo de método de projeto essencialmente empírico se utilizou um outro puramente teórico, que levou a interessantes descobertas, apesar de limitadas até hoje somente à fase de projeto de obras subterrâneas. Esse método utiliza instrumentos matemáticos para descrever o mais fielmente possível o comportamento do terreno e das estruturas de revestimento em termos de tensão-deformação. Os resultados mais importantes obtidos por esses critérios são:

- a definição do conceito de pressão de contenção da cavidade, com a qual o projetista pode controlar a extensão da faixa de terreno em campo plástico ao contorno do núcleo (raio plástico R_p), como demonstrado analiticamente pela primeira vez por Kastner em 1962 [6];
- o reconhecimento que o problema de cálculo para o dimensionamento do revestimento de um túnel é absolutamente tridimensional e que esse efeito não pode ser descuidado, especialmente quando se enfrentam situações de avanço em terrenos sujeitos a elevados estados tensionais em relação às próprias características de resistência e deformabilidade. A esse respeito, Lombardi teve um mérito particular, porque intuiu a importância do núcleo de terreno na frente de escavação para a estática de uma obra subterrânea;
- a demonstração que o valor da pressão exercitada pelo maciço circunstante sobre as estruturas de estabilização e de revestimento de um túnel não é pré - determinada, mas depende, entre outros fatores também da modalidade de escavação e de instalação na obra dessas mesmas estruturas (como foi evidenciado no método de cálculo das 'curvas características' (Lombardi, 1974 [12]) e em 'convergência - confinamento' (Panet ed altri)).

O critério de projeto teórico forneceu aos projetistas os instrumentos de cálculo necessários para avaliar o comportamento tenso-deformativo de um maciço e dimensionar as estruturas de estabilização e de revestimento de um túnel, mas em efeito não considera os problemas construtivos, e por isso não constitui um método de projeto e construção integrado. Por exemplo, não fornece sugestões de como enfrentar as situações de instabilidade da frente de escavação.

A figura 1 mostra esquematicamente os limites apresentados em cada um dos critérios de projeção ilustrados, divididos em cada uma das quatro fases fundamentais de projeção-construção de uma obra subterrânea(fase de conhecimento, fase de diagnóstico, fase de terapia, fase de verificação).

Recentemente, graças aos novos conhecimentos adquiridos durante a fase de pesquisa ilustrada na segunda parte dessa publicação, foi possível pensar em um novo conceito de catalogação de túneis, que, utilizando o que foi feito de bom nos dois critérios tradicionais, supera as limitações dos mesmos fornecendo uma resposta adequada a todas as quatro fases de projeção e construção já citadas (fig. 1).

Nesta terceira e última parte do tratado ilustraremos em modo sintético, mas completo, os conceitos essenciais.

Critério de catalogação conforme o método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos (ADECO-RS)

O método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos se distingue daqueles que até hoje foram usados como referência, devido às diversas características importantes, em parte ilustradas nos capítulos já publicados deste artigo. Entre outras coisas, esse método:

1. prevê que o projeto e a construção de um túnel não se identifiquem mais como no passado, mas representem dois momentos bem distintos e com uma fisionomia bem definida em termos cronológicos e práticos;
2. se refere a um novo tipo de catalogação das obras subterrâneas, baseadas em uma única informação comum a todas as escavações, o comportamento tenso-deformativo do sistema frente de escavação-núcleo de avançamento;
3. se refere à previsão, ao controle e à interpretação da resposta em termos deformativos do maciço à escavação, que se torna a única informação de referência. Inicialmente, por via teórica, como objeto de previsão e controle; depois, por via experimental, como objeto de leitura e interpretação para o acerto do projeto ao longo da obra;
4. introduz o conceito de pré-contenção da cavidade, que integra o já conhecido conceito de contenção, permitindo também resolver as condições estáticas mais difíceis de maneira programada, sem recorrer às improvisações construtivas;
5. prevê o emprego de sistemas conservativos para manter, o quanto mais possível, inalteradas as características geotécnicas e estruturais do terreno, como "material de construção", pois estas têm uma função fundamental sobre a velocidade e a cadência de avanço nos trabalhos subterrâneos.

O elemento peculiar do método é, como mostramos anteriormente, a introdução de um novo conceito de catalogação das obras subterrâneas.

A partir da observação que as deformações do meio durante a escavação e portanto a estabilidade de um túnel são ligadas ao comportamento do núcleo de avanço, se assume como elemento de catalogação, a estabilidade do sistema frente de escavação - núcleo de avanço. Assim, se referindo a um único parâmetro, válido para todos os tipos de terreno (o comportamento tenso-deformativo do núcleo de terreno a montante da frente de escavação), o método supera as limitações dos sistemas adotados até hoje, principalmente no caso de terrenos de baixa consistência.

Em particular, como já ilustrado na segunda parte desse tratado, resultam individualizadas três categorias de comportamento fundamentais (fig. 2):

Categoria A: comportamento de frente estável ou do tipo lapídeo;

Categoria B: comportamento de frente estável a curto prazo ou do tipo coerente;

Categoria C: comportamento de frente instável ou do tipo incoerente.

Categoria A

Ela se manifesta quando o estado de coação no terreno na frente e no contorno da cavidade não supera as características de resistência do meio. O "efeito arco" se forma tanto mais perto do perfil de escavação quanto mais este é aderente ao perfil teórico.

Os fenômenos em termo de deformação evoluem em campo elástico, são imediatos e na ordem de centímetros.

A frente de escavação é globalmente estável. Podem verificar-se somente instabilidades locais devido ao destaque gravitativo de blocos isolados por uma estrutura desfavorável do maciço rochoso. Nesse contexto, a anisotropia da tensão e da deformação do terreno é efetivamente um fator fundamental.

A eventual presença de água, mesmo em um regime hidrodinâmico, não influencia a estabilidade do túnel, a não ser que se tratasse de terrenos alterados ou que gradientes hidráulicos muito intensos provocassem uma erosão tal que baixasse a resistência ao cisalhamento ao longo dos planos de descontinuidade.

As intervenções de estabilização são geralmente destinadas a impedir a degradação do terreno e a conservar o perfil de escavação.

Categoria B

Ela se manifesta quando, ao longo da obra, o estado de coação no terreno, na frente e no contorno da cavidade, excede a capacidade de resistência do meio em campo elástico.

O "efeito arco" não se realiza imediatamente ao contorno da cavidade, mas a uma distância que depende da potência da faixa onde se verifica o fenômeno de plastificação no terreno.

Os efeitos em termos de deformação evoluem em campo elastoplástico. Eles são difíceis, e a ordem de grandeza é decimétrica.

Em cadências normais de avanço, a frente de escavação resulta estável a curto prazo e a sua estabilidade melhora ou piora aumentando ou diminuindo a velocidade de avanço. As deformações do núcleo se apresentam sob a forma de extrusão, não condicionando a estabilidade do túnel, pois o terreno é ainda capaz de mobilizar uma resistência residual suficiente.

Os fenômenos de instabilidade, sob forma de deslocamentos difusos na frente e ao contorno da cavidade deixam o tempo de operar após a passagem da frente com intervenções de estabilização tradicionais de contenção radial. Em tais circunstâncias pode ser necessário também recorrer a ações de pré-contenção da cavidade, equilibrando as intervenções de estabilização entre a frente e a cavidade em modo de conter os fenômenos em termos de deformação em limites aceitáveis.

A presença de água, especialmente se em regime hidrodinâmico, reduz a capacidade de resistência ao cisalhamento do terreno, favorece a extensão da plastificação e aumenta portanto a importância dos fenômenos de instabilidade. É então necessário preveni-la, principalmente na zona da frente, desviando o seu percurso ao esterno do núcleo.

Categoria C

Ela se manifesta quando o estado de coação no terreno excede sensivelmente a capacidade de resistência, mesmo na zona da frente de escavação. O "efeito arco" não

pode formar-se nem na frente nem no contorno da cavidade porque o terreno não possui resistência residual suficiente. Os fenômenos, em termos de deformação, são inaceitáveis porque evoluem imediatamente no campo da ruptura, dando lugar a graves manifestações de instabilidade como o colapso da cavidade, sem deixar tempo de operar com intervenções de contenção radial. É necessário então proceder com intervenções de pré-consolidação a montante da frente de escavação que desenvolvam uma ação de pré-contenção capaz de criar efeitos arco artificiais.

A presença de água em regime hidrostático, se não considerada corretamente, reduz ulteriormente a capacidade de resistência ao cisalhamento do terreno, favorece a extensão da plastificação e aumenta definitivamente a importância dos fenômenos em termos de deformação. A mesma, em regime hidrodinâmico, se traduz em fenômenos de transporte de material e de erosão absolutamente inaceitáveis. É então necessário preveni-la principalmente na zona da frente e desviar o seu percurso ao externo do núcleo.

Com base em experiências adquiridas em mais de vinte e cinco anos de projeto e construção de obras subterrâneas, observa-se que todos os casos de obras já realizados incorrem nessas três categorias de comportamento.

Fases de desenvolvimento do método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos

No desenvolvimento lógico do projeto e da construção de um túnel, o método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos sugere o seguinte procedimento sintetizado no esquema da fig. 3, considerando as respostas afirmativas atribuídas a cada uma das três questões propostas na introdução.

O momento de projeção compreende:

- fase de conhecimento: durante a qual o projetista, em função dos terrenos atravessados pelo túnel, procede à caracterização do meio em termos de mecânica das rochas e dos solos, indispensável para realizar a análise dos equilíbrios naturais pré-existentes e para poder operar corretamente na sucessiva fase de diagnóstico;
- fase de diagnóstico: durante a qual, em base aos elementos obtidos na fase de conhecimento, o projetista procede a uma subdivisão do túnel em partes a comportamento deformativo homogêneo, segundo as três categorias de comportamento A, B, C descritas acima. Os detalhes da evolução da deformação e os tipos de ações mobilizadas pela escavação são definidos para cada uma destas partes.
- fase de terapia: durante a qual, seguindo as previsões feitas na fase de diagnóstico, o projetista escolhe o tipo de ação que adotará (pré-contenção ou simples contenção) e as intervenções que serão necessárias, segundo as três categorias de comportamento A, B, e C, para obter a completa estabilização do túnel. Ele fará a composição das seções tipos longitudinais e transversais dimensionando-as e verificando-as com eficácia através dos instrumentos de cálculo matemático.

O momento da construção compreende:

- fase operativa: durante a qual realiza-se a instalação dos instrumentos de estabilização segundo as previsões do projeto, adaptando-os em termos de contenção e pré-contenção à real resposta deformativa do maciço e controlando-os segundo planos de controle de qualidade pré-estabelecidos.

- fase de verificação: na qual, através da leitura e da interpretação dos fenômenos deformativos (que são a resposta do meio à ação de avanço), verifica-se que as previsões feitas nas fases de diagnóstico e de terapia sejam confirmadas durante a construção da obra, a fim de aperfeiçoar o acerto do projeto através do balanceamento dos instrumentos de estabilização entre a frente de escavação e a cavidade. A fase de verificação não termina nem mesmo com o túnel acabado, mas continua durante toda a sua vida útil com o objetivo de controlar constantemente a segurança em exercício.

Projetar corretamente uma obra subterrânea significará então saber prever, em base ao conhecimento dos equilíbrios naturais pré-existentes, o comportamento que o terreno vai ter durante a escavação em termos de causa e evolução dos fenômenos deformativos, e em consequência definir, segundo as três categorias de comportamento fundamentais, os tipos de ações agentes (contenção e pré-contenção) e as tipologias das intervenções capazes de conter-lhes nos limites aceitáveis, estabelecendo tempos e ritmos de aplicação em função do avanço e da posição da frente de escavação.

Construir corretamente uma obra subterrânea significará, também, agir respeitando as escolhas feitas em fase de projeto: a princípio lendo atentamente a resposta em termos de deformação do terreno em função da ação do avanço e das intervenções de estabilização, em termos de estrusões e convergências superficiais e profundas da frente e das paredes da escavação; enfim, aperfeiçoando (depois de interpretados os resultados das leituras) o comprimento máximo de escavação, velocidade e ritmo de avanço, intensidade, instalação e tempo de aplicação das intervenções de estabilização; balanceando-os oportunamente entre a frente e o perímetro de escavação.

Fase de conhecimento

Realizar uma escavação subterrânea significa perturbar os equilíbrios pré-existentes no meio. Projetar esta escavação reduzindo ao mínimo o distúrbio ao meio no qual devemos operar, e portanto reduzindo ao mínimo a resposta em termos de deformação, pressupõe então o conhecimento preventivo e o mais completo possível do estado dos equilíbrios naturais presentes no terreno antes da intervenção.

Ocorre então a necessidade de preceder a projeção e portanto a construção de um túnel de uma fase de conhecimento durante a qual acontece a caracterização do meio através da aquisição de elementos litológicos, estruturais, estratigráficos, morfológicos, tectônicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geomecânicos e tensionais, indispensáveis ao projetista para concluir a análise dos equilíbrios naturais pré-existentes e para poder operar corretamente na fase sucessiva de "diagnóstico".

O estudo na fase de conhecimento procede em duas etapas sucessivas (fig. 4).

Na primeira etapa confeccionamos um perfil geológico de prova em eixo traçado, desenvolvido em base à Carta Geológica 1:1.000.000, à bibliografia existente e aos relevos existentes de superfície, compreendendo:

- o relevo litológico, com individualização das unidades principais;
- o relevo geomorfológico, com atenção particular às condições de estabilidade de taludes;

- o relevo hidrogeológico, com a determinação do sistema hidrológico principal e a catalogação das nascentes. Destas últimas é indispensável medir o caudal, seguindo a evolução do mesmo no decorrer da obra para estabelecer a influência do efeito drenante da cavidade.

O perfil de prova será acompanhado de uma série de fichas litológicas dos litótipos encontrados em afloramentos ao longo do traçado, nas quais se encontrarão as sínteses dos relevos efetuados.

No caso onde o estudo de primeira fase disponha de um túnel piloto (fig. 5), a projeção (executiva) pode vantajosamente aproveitar-se dos relevos geológicos e geomecânicos do túnel piloto [4] [5], além dos ensaios in situ projetados para a avaliação das características de resistência e deformabilidade do maciço rochoso.

Na segunda etapa, com base nos resultados da primeira etapa, será elaborado o projeto das prospecções geognósticas, compreendendo a definição das prospecções geofísicas indiretas, dos ensaios in situ e das sondagens, principalmente a carotagem contínua, de calibração, com recuperação dos corpos de prova não perturbados na porção do maciço interessada pela escavação.

É indispensável que a colheita de amostras indisturbadas seja feita com equipamentos apropriados que disturbem minimamente o maciço.

As amostras colhidas serão utilizadas para a avaliação das propriedades físico-químicas do maciço rochoso também em relação às suas evoluções no tempo, e para a avaliação dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos.

Serão assim determinados:

- a curva intrínseca da matriz do material;
- os parâmetros de deformabilidade da matriz (módulo elástico inicial e módulo de deformação total avaliado por níveis de solecitação comparáveis àqueles que se instaurarão depois da construção da obra).

Se possível, é importante determinar as características de resistência e deformabilidade de eventuais discontinuidades estruturais, a partir das quais obter as curvas intrínsecas e os parâmetros de deformabilidade do maciço em base a considerações detalhadas.

O estudo da segunda etapa se completa com a estima do estado natural das tensões, em base ao recobrimento e às estruturas tectônicas principais.

Segundo a importância da obra projetada e a complexidade das estruturas tectônicas interessadas, pode ser muito útil efetuar, sempre que possível, ensaios de medidas do tensor natural dos esforços ao nível de profundidade da cavidade.

Fase de diagnóstico

Na fase de diagnóstico o projetista, com base nos elementos armazenados na fase de conhecimento, procede a uma subdivisão do traçado em trechos de comportamento em termos de deformação homogêneo segundo as três categorias de comportamento A, B, C (frente estável, frente estável a curto prazo, frente instável). Seguindo esse objetivo ele faz previsões teóricas sobre a resposta em termos de deformação do meio à ação de escavação, preocupando-se particulamente com os fenômenos deformativos que, na ausência de intervenções de estabilização, se manifestariam na frente de escavação e por consequência na faixa de terreno ao contorno da cavidade.

A análise da resposta deformativa do sistema frente de escavação - núcleo de avanço e da cavidade é feita, em termos de gênese, localização, evolução e importância, recorrendo aos métodos experimentais e instrumentos matemáticos como as curvas características, modelos a elemento finito bi e tridimensionais, etc, que, em função da

credibilidade dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos de entrada, sejam em grau de orientar o projetista na divisão dos diversos trechos de túnel nas três categorias de comportamento A, B, C já citadas.

Entre estes últimos, o método das curvas características [12], utilizável na maior parte das situações correntes, parecem particularmente úteis e simples de usar para conseguir este objetivo (fig. 6).

Entre os métodos experimentais, em certos tipos de terreno os ensaios de extrusão em célula triaxial consentem a simulação em laboratório, em corpos de prova não perturbados de material colhido "in situ", do avanço do túnel sob estes vários recobrimentos e as mudanças tensionais devido à ação de escavação do sistema frente de escavação - núcleo de avanço, evidenciando o seu tipo de comportamento (fig. 6).

O resultado do estudo do diagnóstico enfim se concretiza na confecção de um perfil longitudinal do túnel em questão, sobre o qual será evidenciada a subdivisão em trechos de comportamento deformativo homogêneo e as categorias de comportamento (A,B,C) a essas associadas.

Definida a pertinência de cada um dos trechos a uma das três categorias de comportamento, ainda faz parte da fase de diagnóstico a individualização, no caso de cada categoria de:

- a) tipologia de deformação que se desenvolverá ao contorno da cavidade (extrusão, pré-convergência e convergência);
- b) manifestações de instabilidade recorrentes, tais como:
 - queda de blocos por efeito do peso próprio e deslocamento da frente, devido à extrusão do núcleo e à pré-convergência;
 - queda de blocos por efeito do peso próprio e deslocamento ao contorno da cavidade devido à convergência da cavidade;
 - colapso da cavidade devido ao desmoronamento da frente.
- c) ações mobilizadas pela escavação segundo modelos a sólido de cargas e a anéis plastificados (fig. 7).

Fase de terapia

Na fase de terapia o projetista, com base nas categorias de comportamento atribuídas na fase de diagnóstico, escolhe o tipo de ação a adotar (pré-contenção, contenção, ou pré-sustentação) para obter a completa estabilização do túnel (controle dos fenômenos em termos de deformação).

Conforme o que foi exposto anteriormente sobre a importância da rigidez do núcleo de avanço no comportamento em termos de deformação da frente e da cavidade e, em consequência da estabilidade geral do túnel, conclui-se que o núcleo:

- poderá limitar-se a exercer simplesmente ações de contenção, no caso de túneis com comportamento deformativo a frente estável (Categoria A);
- deverá obrigatoriamente produzir ações enérgicas de pré-contenção, além, obviamente, daquelas de contenção - no caso de túneis com comportamento deformativo a frente instável (Categoria C);
- poderá optar entre pré-contenção da cavidade ou simples contenção da mesma, em função da velocidade e ritmo de avanço que estima de poder realizar, no caso de túneis com comportamento deformativo a frente estável a curto prazo (Categoria B).

Quando o tipo de ação a exercitar for escolhido,deverá ser aperfeiçoado em termos de sistemas, ritmos, fases de escavação e acima de tudo intervenções e instrumentações de estabilização, estabelecendo para esses últimos como e onde

deverão ser colocados na obra em relação à posição da frente de escavação, em função das três categorias de comportamento A,B,C, a fim de que produzam a ação desejada.

Para obter na prática o tipo de ação pré-escolhido, o projetista tem a disposição uma série de instrumentos com os quais pode realizar todos os tipos de intervenções de estabilização necessários.

Lembrar que as intervenções de estabilização são do tipo:

- conservadora, quando o seu efeito primário é aquele de conter a redução da tensão principal menor;
- melhoramento, quando agem principalmente incrementando as características de resistência ao cisalhamento do meio;

entre os instrumentos a disposição do projetista no caso **de intervenções que produzem ações de pré-contenção na cavidade** [13] (fig. 8), os que exercem um efeito essencialmente conservador são:

- telhas de concreto projetado com fibras realizadas através do pré-corte mecânico no perfil de escavação, utilizando o mesmo pré-corte mecânico como cofragem [15] [16];
- pré-consolidação do núcleo, para profundidades não inferiores a um diâmetro de escavação, mediante tubos de fibra de vidro fixados no terreno com malta de cimento. A intensidade será definida em função do incremento de resistência ao cisalhamento que se deseja conferir ao mesmo [15] [16] [17] [18] [19] [20];
- guarda-chuvas tronco-cônicos, constituídos pela aproximação de colunas sub-horizontais de terreno consolidado mediante jet-grouting [15] [18].

Exercendo, ao invés, um efeito essencialmente de melhoramento:

- guarda-chuvas tronco-cônicos de terreno consolidado mediante injeções convencionais ou por congelamento;
- guarda-chuvas tronco-cônicos de drenagem, quando em presença de água.

Entre os instrumentos à disposição do projetista no caso **de intervenções que produzem ações de contenção na cavidade**, os que exercem um efeito essencialmente conservador são:

- cascas de concreto projetado de primeira fase, capazes de produzir, em função da própria espessura, uma pressão de contenção ao contorno da cavidade;
- escavação mecânica a seção plena mediante shilds a pressão, capazes de produzir uma pressão de contenção sob a frente e sob a cavidade (anel de revestimento de arcos pré-fabricados);
- escavação mecânica mediante shilds abertos ou lanças, que fornecem uma contenção radial ao terreno durante as operações de escavação;
- agulhamento radial realizada mediante tubos a ancoragem pontilhada que aplica, nas paredes do túnel uma pressão de contenção "ativa", seu valor é determinado pela pré-tensão a qual foram tirados os tubos;
- invert, que cria uma estrutura de revestimento fechado, multiplicando a capacidade do arco de revestimento de primeira e segunda fase de desenvolver elevadas pressões de contenção ao contorno da cavidade.

Exercendo, ao invés, um efeito essencialmente de melhoramento:

- anel de terreno armado ao contorno da cavidade, realizado através tubos a aderência contínua capazes de incrementar a resistência do terreno ao cisalhamento produzindo uma elevação da curva intrínseca desse terreno.

Os instrumentos que não pertencem a essas duas categorias porque não produzem ação de pré-contenção nem de contenção, se dizem intervenções de pré-sustentação ou de sustentação, segundo que exerçam ou não exerçam ações a montante da frente de escavação. Eles não têm qualquer influência na formação do "efeito arco", não sendo capaz nem de conter de modo positivo o relaxamento da tensão principal menor nem de melhorar de modo determinante a resistência ao cisalhamento do terreno.

Fazem parte destas intervenções de pré-sustentação, por exemplo, as enfilagens, herdeiras do "marcha vante", que apesar de serem constituídos de elementos estruturais apoiados sobre cambotas instaladas depois da escavação e colocados perpendicularmente a uma geratriz circular, não são capazes de produzir o efeito arco em avanço por falta de recíproca colaboração no sentido transversal.

Composição das seções tipo

Nos parágrafos anteriores vimos que a estabilidade do sistema frente de escavação - núcleo de avanço tem uma parte fundamental sobre a resposta em termos de deformação do maciço à abertura da cavidade subterrânea e portanto sobre a estabilidade do túnel a curto e a longo prazo.

Vimos também que as condições de estabilidade deste sistema foram sintetizadas em três categorias de comportamento fundamentais, que caracterizam e catalogam, portanto, o tipo de túnel a realizar no trecho em exame e, em consequência, a escolha das intervenções de estabilização as quais entregar a estabilidade e a segurança da obra.

Assim sendo, na figura 9, de acordo com a caracterização proposta, é indicado esquematicamente o campo de aplicação dos diferentes instrumentos de estabilização a disposição do projetista, o qual sintetizará as seções tipo capazes de garantir a realização da escavação a curto e a longo prazo do túnel. Em particular:

- nos trechos de túnel com a frente estável (categoria de comportamento: A, solicitações: em campo elástico, manifestações de instabilidade típicas: queda de blocos por efeito do peso próprio), as intervenções de estabilização propostas têm essencialmente uma função de proteção e são determinadas pela era geo-estrutural do maciço e de eventual presença de água.
- nos trechos de túnel com a frente estável a curto prazo (categoria de comportamento: B, solicitações: em campo elastoplástico, manifestações de instabilidade típicas: deslocamento por estrusão do núcleo, pré-convergência e convergência da cavidade), as intervenções de estabilidade devem garantir a formação do efeito arco o mais próximo possível do contorno da escavação. Se propõem portanto instrumentos capazes de impedir a relaxação das características de resistência e deformação do terreno, principalmente quanto ao sistema frente de escavação - núcleo de avanço, desenvolvendo ações de contenção ou pré-contenção adequados para contrastar o aparecimento de fenômenos de plastificação do maciço, ou pelo menos de limitar a sua extensão.
- nos trechos de túnel com a frente instável (categoria de comportamento: C, solicitações: em campo de ruptura, manifestações de instabilidade típicas: desmoronamento da frente, colapso da cavidade) as intervenções de estabilização devem garantir antecipadamente a formação de um efeito arco artificial na frente de escavação. Se propõem, portanto, instrumentos de pré-contenção da cavidade que, assegurando a estabilidade do sistema frente de escavação - núcleo de avanço, impeçam

a anulação da tensão principal menor σ_3 quando os fenômenos em termos de deformação são ainda controláveis.

A tabela da figura 9 pode então ser utilizada pelo projetista como referência para a definição das seções tipo longitudinais e transversais.

A figura 10 ilustra um exemplo de composição da seção tipo C1.

Dimensionamento e verificação das seções tipo. Síntese da fase de terapia

Depois de haver escolhido o tipo de ação a exercitar, projetadas as intervenções para realiza-las e compostas as seções tipo, o projetista deve ainda dimensiona-las e verifica-las com os métodos de cálculo já empregados na fase de diagnóstico. Em particular, é muito importante a verificação de um correto equilíbrio das intervenções entre a frente e o perímetro da escavação e a avaliação do seu grau de eficiência em função da aceitação do comportamento previsto em termos de tensão e deformação para o túnel quando for realizada a intervenção. Naturalmente, segundo a particular situação de tensão e deformação suposta, o cálculo pode ser feito utilizando simples modelos de "convergência-contenção" ou, ao contrário, complexos modelos de extrusão-contenção ou extrusão-pré-contenção.

O resultado do estudo da terapia pode ser então sintetizado no perfil geomecânico do túnel mostrando, para cada trecho com comportamento em termos de deformação homogêneo, a seção tipo adotada.

Fase de verificação

Passado o momento de projeção, inicia a fase de escavação (momento da construção) que coincide com aquela da verificação em relação à credibilidade das previsões feitas em fase de diagnóstico e de terapia em termos de fenômenos deformativos.

Esta verificação (que adquire uma importância considerável visto que o inteiro projeto se baseia nessas previsões) se faz através das medições e do controle da "resposta" real do meio à ação da escavação, resposta que se manifesta sob forma de fenômenos em termos de deformação:

- ao interno da cavidade, em correspondência à frente e às paredes da escavação;
- em superfície, em correspondência ao traçado do túnel.

Com este objetivo, é prevista a pré-disposição de estações de medição a montante, em correspondência e a juzante da frente de escavação (fig. 11).

De fato, quando se prevê que o avanço da frente acontecerá em condições de estabilidade a curto prazo ou de instabilidade, cada vez que o recobrimento do túnel o permite, é particularmente interessante e aconselhável realizar uma determinada seção, antes da chegada da frente, de instrumentos multibase verticais adequados à medição de fenômenos deformativos radiais que precedem a sua chegada (pré-convergência).

Em correspondência ao sistema frente de escavação - núcleo de avanço, será possível, com os "sliding micrometers" longitudinais e extensímetros radiais multibase e com haste, controlar respectivamente as extrusões e as convergências superficiais e profundas ao interno do maciço, a distâncias variáveis do perfil de escavação, enquanto que com especiais extensímetros a fita se controlarão as convergências perimetrais a juzante da frente.

Quanto mais essas medições forem executadas sistematicamente e com precisão tanto mais resultarão confiáveis e úteis essas informações ao projetista, ao qual a tarefa poderá resultar mais ou menos complexa de acordo com a evolução destes fenômenos.

De fato, se o avanço acontece em um meio a comportamento lapídeo ou incoerente (respectivamente Categoria A ou C), onde os fenômenos deformativos previstos são tão reduzidos que não chegam a preocupar (caso dos terrenos litóides com pouco ou médio recobrimento) ou tão elevados que são inaceitáveis e que obrigam o procedimento de pré-contenção da cavidade (caso dos terrenos incoerentes sob qualquer recobrimento, argilosos e litóides sob altos recobrimentos) o peso dos controles é efetivamente reduzido, considerando o fato de que os fenômenos deformativos evoluem rapidamente no tempo e que esta evolução é limitada. Em consequência a tarefa do projetista é muito aliviada quando a escolha do controle é adequada à situação real.

Diverso é o esforço do projetista e diversa é a atenção que deve dar à análise das deformações do sistema frente de escavação - núcleo de avanço e das convergências superficiais e profundas da cavidade, seguindo a sua evolução no tempo e no espaço, quando o avanço acontece em um meio a comportamento do tipo coerente (Categoria B).

Neste caso, tratando-se de fenômenos deformativos lentos, progressivos e difíceis, de valor sempre crescente, somente com a leitura contínua das medições o projetista pode obter as informações necessárias para otimizar a intensidade e o equilíbrio das intervenções de estabilização adotadas e tarar fases, ritmos e sistemas de escavação.

Portanto, é desnecessário sublinhar quanto seja importante saber interpretar corretamente os resultados fornecidos por esses controles, porque é da sua correta interpretação que depende o acerto do projeto na obra.

Ao contrário é muito importante sublinhar que a fase de verificação não termina com o túnel realizado, mas deve prosseguir através da monitoração sistemática, destinada a controlar a segurança do túnel no arco de toda a sua vida de exercício.

Conclusões

O critério de projeto baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos é um critério de projeção e construção de obras subterrâneas válido em qualquer tipo de terreno, que explora o conhecimento, os meios de cálculo, as tecnologias mais modernas (fig. 12), oferece aos projetistas uma guia simples para catalogar um túnel em uma das três categorias de comportamento fundamentais, assumindo como referência as condições de estabilidade do sistema frente de escavação - núcleo de avanço previstas através do estudo teórico profundo das tensões e deformações conduzidos com cálculos matemáticos. Para cada um dos trechos o projetista decide, em função do tipo de comportamento previsto, o tipo de ação (pré-contenção ou simples contenção) necessária para obter o controle dos fenômenos deformativos e, por consequência, escolher as intervenções de estabilização e a seção tipo longitudinal e transversal mais adequada à situação. São previstas seções tipo apropriadas para cada tipo de terreno e cada situação de tensão e deformação. Seus custos (por metro linear de túnel) e tempo de execução necessários são individualizados automaticamente.

Assim:

- Valorizamos a importância das intervenções como instrumentos indispensáveis para controlar os fenômenos deformativos, então como "elementos estruturais" finalizados à estabilidade final da cavidade (os túneis são catalogados e pagos em proporção a quanto se deformam). Por isso, é importante notar que no balanço econômico de uma obra subterrânea, as intervenções de estabilização e consolidação do terreno restam as únicas variáveis significativas entre os itens de escavação e revestimento que, sempre mais freqüentemente, tendem a ser consideradas como constantes em todos os tipos de terreno (fig. 13);

- Induzimos o construtor, baseando-se em um projeto completo e confiável, a industrializar as operações de avanço em cada tipo de terreno, mesmo nos mais difíceis;
- Evitamos, com a possibilidade de planejar as intervenções, tempos e custos de construção, as contestações que normalmente, até hoje, se instauram entre a Direção da obra e a Empresa de construção;
- Evitamos, assumindo como referência um só parâmetro comum a todos os tipos de terreno (o comportamento da tensão e deformação da frente de escavação) facilmente e objetivamente quantificável durante o avanço das obras, o maior inconveniente dos sistemas de classificação anteriores (confrontar classes geomecânicas com deformações) que até hoje aumentam as contestações entre a Direção da obra e a Empresa de construção.

Devido a essas importantes características, o critério foi analisado pela Comissão do Ministério de Obras Públicas, com o objetivo de confeccionar uma norma técnica e uma tabela completa de preços válidas no território nacional, analogamente ao que foi feito por três importantes Administrações italianas [21] [22] [23], que recentemente atualizaram as próprias tarifas.

Com as exigências ditadas pela planificação, a arte de projetar e construir obras subterrâneas talvez perde um pouco do seu fascínio, mas com certeza adquire, sem obrigar ou condicionar a criatividade do projetista, em eficiência e funcionalidade.

Bibliografia

- [1] LUNARDI P., "Projeto e construção de túneis segundo o método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos - Pré-sustentação e pré-contenção", Associação brasileira de mecânica dos solos, 1995
- [2] LUNARDI P., "Projeto e construção de túneis segundo o método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos - Pimportância da pesquisa experimental e seus resultados", Associação brasileira de mecânica dos solos, 1995
- [3] BIENIAWSKI Z.T., "Rock mass classification as a design aid in tunnelling", Tunnels & Tunnelling, Luglio 1968
- [4] LUNARDI P., "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota", Politecnico di Torino, Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, 25-26 Novembre 1986
- [5] CAMPANA M., LUNARDI P., PAPINI M., "Dealing with unexpected geological conditions in underground construction: the pilot tunnel technique", Acts of 6th European Forum on Cost Engineering - Università Bocconi, Milano, 13-14 maggio 1993, Vol. 1
- [6] KASTNER H., "Statik des Tunnel-und Stollenbaues, 1971
- [7] RABCEWICZL. V., "The New Austrian Tunnelling Method", Water Power, 1969
- [8] KOVARI K., "On the Existence of the NATM: Erroneous Concepts behind the New Austrian Tunnelling Method", Tunnel, 1/1994
- [9] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie: presentazione del metodo ADECO-RS", ISMES - Programma di istruzione permanente - Bergamo 14-16 Novembre 1988
- [10] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method", Acts of 6th European Forum on Cost Engineering - Università Bocconi - Milano, 13-14 Maggio 1993
- [11] LUNARDI P., "Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo", SAMOTER: Convegno su "La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo" - Verona, 27-28 Maggio 1993

- [12] LOMBARDI G., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", International Congress ISRM, Denver, 1974
- [13] LUNARDI P. "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano 18-20 Marzo 1991
- [14] LUNARDI P., "Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'Arco Cellulare", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 29 anno 1989
- [15] LUNARDI P. et al., "Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories", Soft Ground Tunnelling Course - Institution of Civil Engineers - Londra 10-12 Luglio 1990
- [16] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Nouvelles Orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Etudes et experiences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front", Colloque International "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble - Parigi 7-10 Febbraio 1989
- [17] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A., "Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation", Convegno Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling" - Acapulco 16-20 Maggio 1992
- [18] LUNARDI P., "Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles" Comité Marocain des Grands Barrages - Rabat, 30 Settembre 1993
- [19] LUNARDI P. "Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils" SAIE Seminar on "The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering" - Bologna, 22 Ottobre 1993
- [20] LUNARDI P. "La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterraines en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement", Symposium international "Renforcement des sols: expérimentation en vraie grandeur des années 80", Parigi 18-19 Novembre 1993
- [21] AUTOSTRADE S.p A , "Norme Tecniche d'Appalto", 1992
- [22] ITALFERR SIS T A V S.p.A., "Capitolato di Costruzione Opere Civili", 1992
- [23] A.N.A.S., "Capitolato Speciale d'Appalto parte II: Norme Tecniche" 1993

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS
SISTEMA ADECO-RS

FIG-1

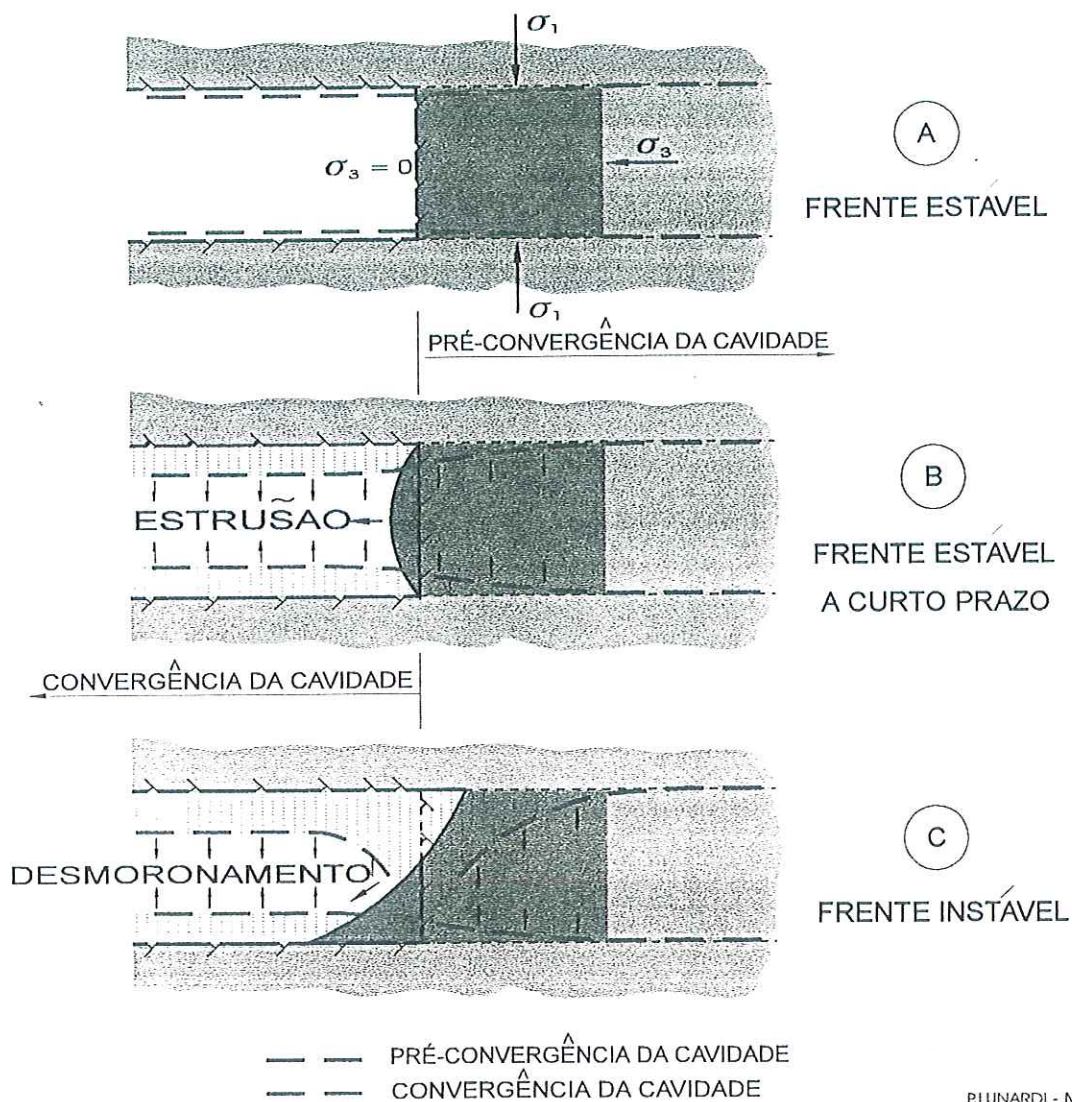
CONFRONTO ENTRE AS CONTRIBUIÇÕES FORNECIDAS PELAS DIVERSAS ESCOLAS
AO PROBLEMA DA PROJETAÇÃO E DA CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

Métodos de projeção e/ou de construção projetação	Teoria de Kastner - Fenner	NATM	Classificações geomecânicas (Beniawski, Barton, ecc.)	Teoria das curvas características	ADECO-RS
Fase de Conhecimento	●		●	●	●
Fase de Diagnóstico	●		●	●	●
Fase de Terapia		●			●
Fase de Verificação		●		●	●

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS
SISTEMA ADECO-RS

FIG.2

Definição das CATEGORIAS DE COMPORTAMENTO em função do núcleo e da frente de escavação; vistas como instrumento de estabilização



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS
SISTEMA ADECO-RS

FIG.3

MOMENTO	FASE	ARGUMENTO
DE PROJETAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> - DE CONHECIMENTO - DE DIAGNÓSTICO - DE TERAPIA 	<ul style="list-style-type: none"> - análise dos equilíbrios naturais pré-existent - estudo e previsão de fenômenos em termos de <u>deformação em ausência de estabilização (*)</u> - <u>regularização dos fenômenos deformativos (*)</u>
DE CONSTRUÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> - OPERATIVA - VERIFICAÇÃO DURANTE A OBRA - ACERTO DO PROJETO 	<ul style="list-style-type: none"> - aplicação dos instrumentos de estabilização para a <u>regularização dos fenômenos deformativos (*)</u> - <u>contrôle e leitura dos fenômenos deformativos (*)</u> como reposta do maço rochoso durante o avanço das escavações (medição da extrusão da frente e das convergências superficiais e profundas da cavidade) - <u>interpretação dos fenômenos deformativos (*)</u> - balanceamento dos sistemas de estabilização entre a frente e o perímetro da escavação

(*) Fenômenos deformativos em termos de extrusão da frente e das convergências superficiais e profundas da cavidade

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

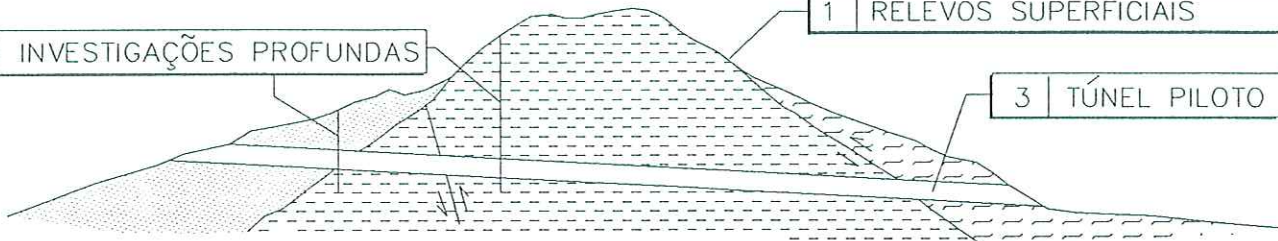
FIG.4

FASE DE
CONHECIMENTO

2 INVESTIGAÇÕES PROFUNDAS

1 RELEVOS SUPERFICIAIS

3 TÚNEL PILOTO



ANÁLISE DOS EQUILÍBRIOS
NATURAIS PRÉ-EXISTENTES



DETERMINAÇÃO DOS
PARÂMETROS



1 INVESTIGAÇÕES SUPERFICIAIS

morfologia
tectônica
estrutura
litologia
estratigrafia
hidrologia
geotécnica e geomecânica

2 INVESTIGAÇÕES PROFUNDAS SUR

estratigrafia
litologia
estrutura
hidrologia
geotécnica e geomecânica

3 TÚNEL PILOTO

caracterização completa
geo-estrutural e
hidrogeológica do maciço rochoso

análise dos parâmetros da
fresa

ensaios "in situ" e em
laboratório

análise cinemática das
instabilidades

medição das convergências

ESTADO DE TENSÃO NATURAL

$$\lambda = \frac{P_h}{P_v}$$

SISTEMAS DE DISCONTINUIDADE

ANISOTROPIA

CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA

$$\begin{array}{ll} \sigma_c & \sigma_t \\ \sigma_{gd} & \sigma_{gz} \\ c_p, c_r & \varphi_p, \varphi_r \end{array}$$

CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE

$$\begin{array}{ll} E_t & E_s \\ E_d & E_{dt} \end{array}$$

ν

CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE

k

PRESSÕES HIDROSTÁTICAS
E HIDRODINÂMICAS

GRADIENTE HIDRÁULICO

i

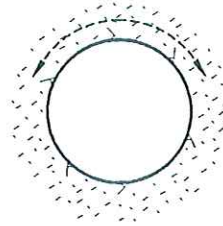
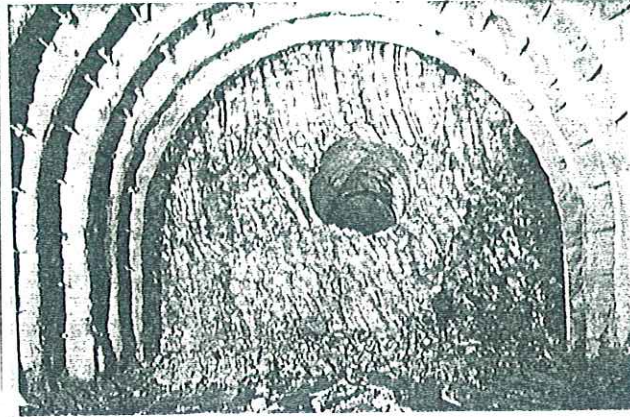
ALIMENTAÇÃO
DO LENÇOL FREÁTICO

Q

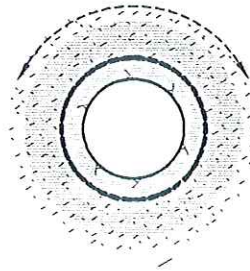
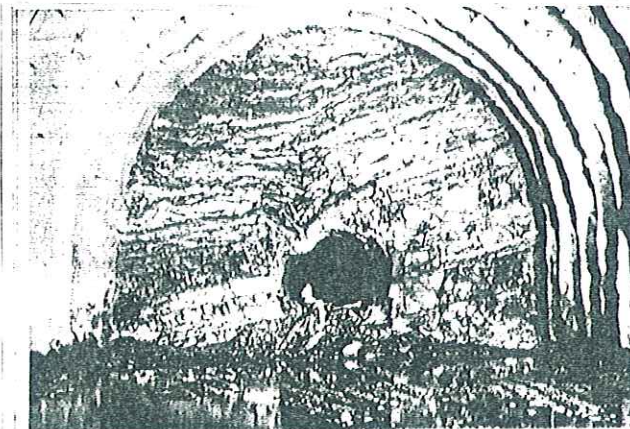
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS
SISTEMA ADECO-RS

FIG.5

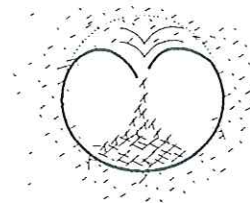
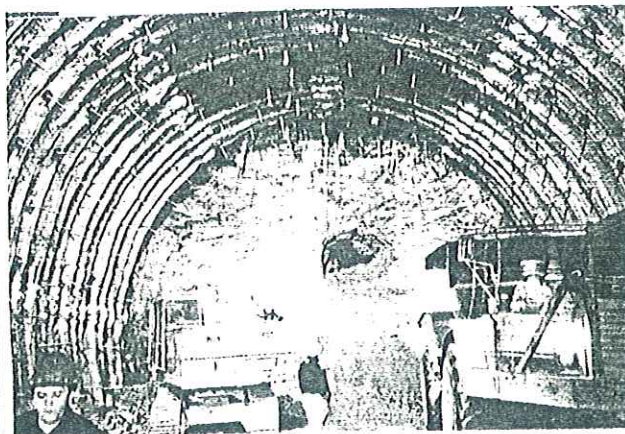
TÚNEL PILOTO E EFEITO ARCO



① NATURAL



② DESVIADO



③ NULO

P.LUNARDI - MILANO

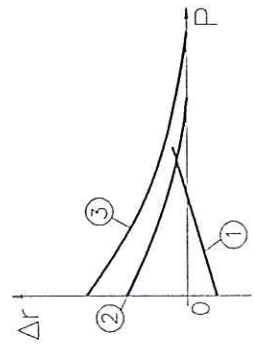
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

FIG.6

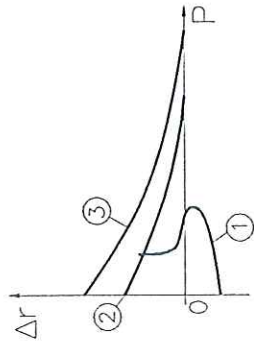
FASE DE
CONHECIMENTO

PREVISÃO DA CATEGORIA DE COMPORTAMENTO

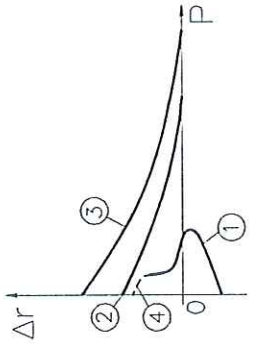
ATRAVÉS DO MÉTODO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS



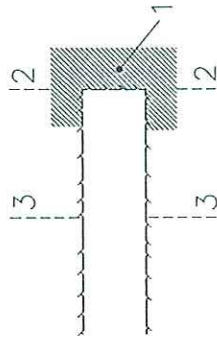
categoria A
"frente estável"



categoria B
"frente estável a curto prazo"

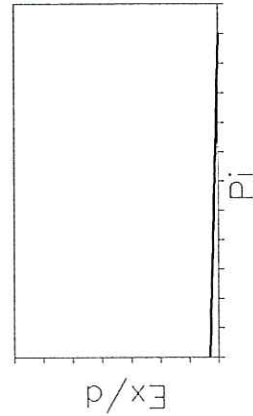


categoria C
"frente instável"

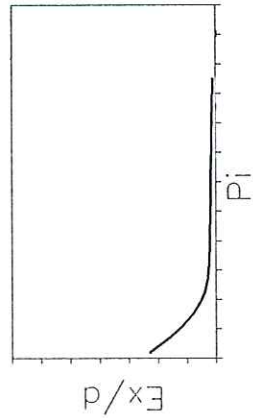


- ① curva característica do núcleo
- ② curva característica da cavidade em correspondência da frente
- ③ curva característica da cavidade longe da frente
- ④ ruptura do núcleo

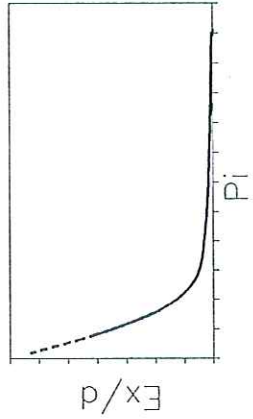
ATRAVÉS DO ENSAIO DE EXTRUSÃO



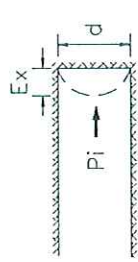
categoria A
"frente estável"



categoria B
"frente estável a curto prazo"



categoria C
"frente instável"

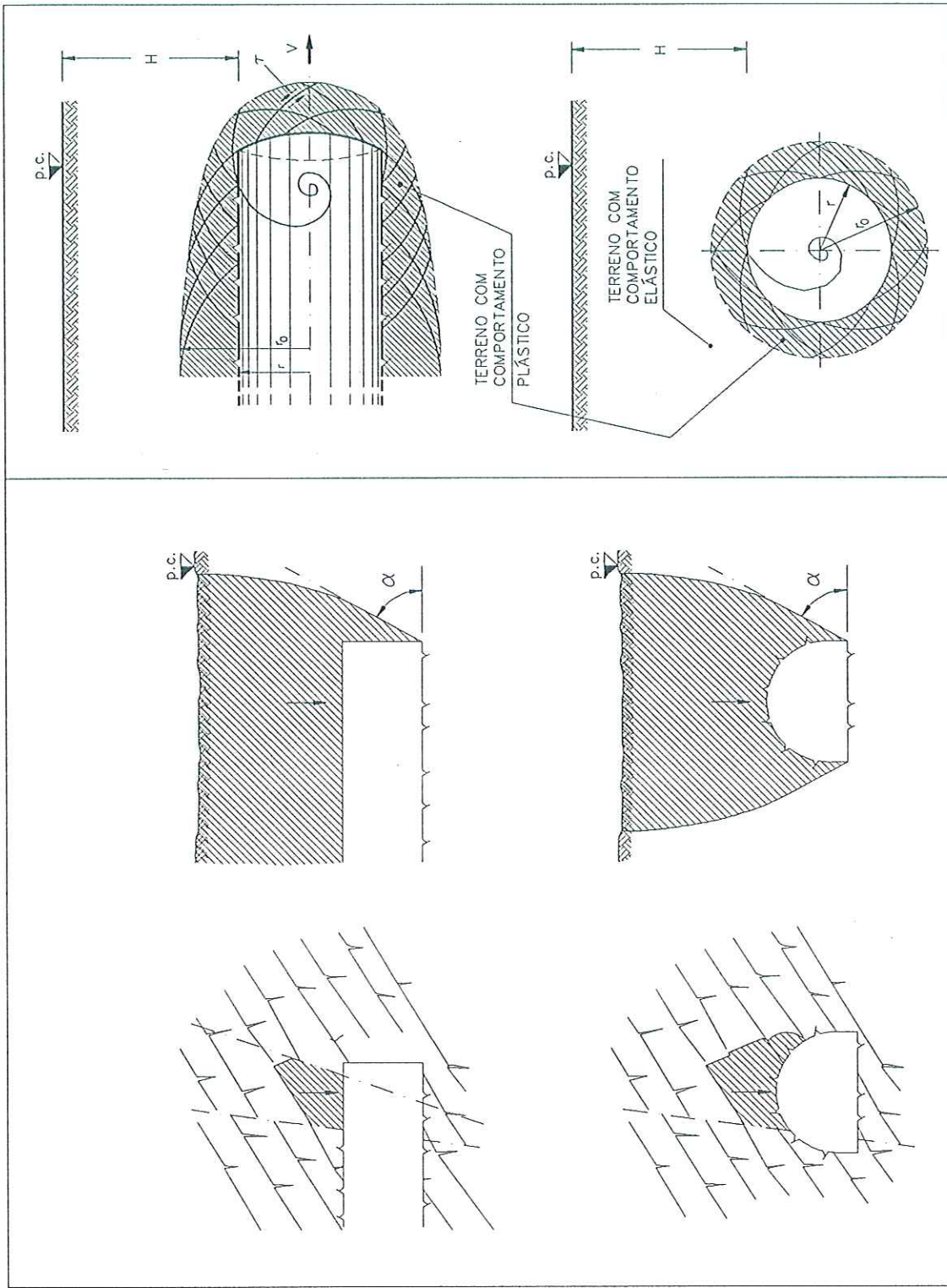


Pi = PRESSÃO DE CONTENÇÃO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

FASE DE DIAGNÓSTICO

COMPORTAMENTO A SÓLIDOS DE CARREGAMENTO E ANÉIS PLASTIFICADOS



SÓLIDOS DE CARREGAMENTO

ANÉIS PLASTIFICADOS

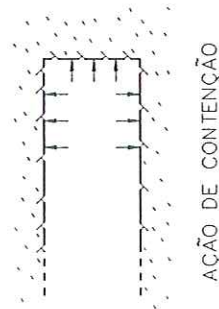
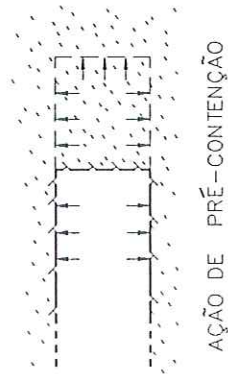
FIG. 7

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS
SISTEMA ADECO-RS

FIG.8

EFEITO DAS INTERVENÇÕES POR AÇÃO DE CONTENÇÃO E PRÉ-CONTENÇÃO

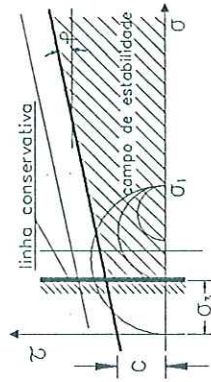
FASE DE
TERAPIA



AÇÃO NA CAVIDADE	INSTRUMENTOS DE ESTABILIZAÇÃO	INTERVENÇÕES AGENTES EM		H ₂ O EM PRESSÃO
		c.p	$\bar{\sigma}_3$	
PRÉ-CONTENÇÃO	INJEÇÕES CONVENÇIONAIS	*	*	*
	CONGELAMENTO	*	*	*
	JET-GROUTING SUB-HORIZONTAL	*	*	*
	PRÉ-CORTE E PRÉ-TÚNEL	*	*	*
	DRENAGENS	*	*	*
CONTENÇÃO	REFORÇO DO SOLO NO CONTORNO DA CAVIDADE E DO NÚCLEO POR MEIO DE TUBOS DE FIBRA DE VIDRO	*	*	*
	SPRITZ-BETON	*	*	*
	CONCRETO PROJETADO SHIELD MECÂNICO	*	*	*
	CONCRETO PROJETADO SHIELD HIDRÁULICO	*	*	*
	AGULHAMENTO A ADERÊNCIA CONTINUA	*	*	*
	AGULHAMENTO A ANCOR, POR PONTOS	*	*	*
	INVERT	*	*	*
	SHIELD ABERTO	*	*	*
	ENFLAQUECIMENTO	*	*	*
	ENFLAQUECIMENTO	*	*	*

LEGENDA

- (•) = INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS
- $\bar{\sigma}_3$ = PRESSÃO DE CONTENÇÃO
- c = COERÊNCIA DO TERRENO
- ρ = ÂNGULO DE ATRITO DO TERRENO

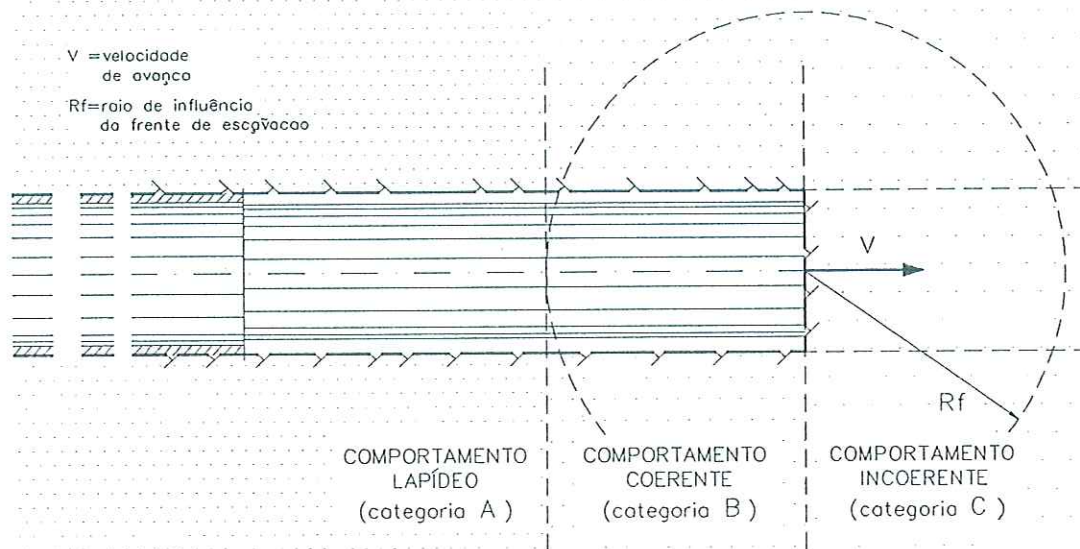


PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

FIG.9

FASE DE
TERAPIA

CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS INSTRUMENTOS DE ESTABILIZAÇÃO PARA A COMPOSIÇÃO DAS SEÇÕES TIPO



FRETE		ESTÁVEL		ESTÁVEL A CURTO PRAZO			INSTÁVEL					
		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	
INSTRUMENTOS DE ESTABILIZAÇÃO	TUBOS RADIAIS			●	●							
	CONCRETO PROJETADO ARMADO *			●	●	●	●	●	●	●	●	●
	REFORÇO DO NÚCLEO POR MEIO DE TUBOS EM FIBRA DE VIDRO					●		●		●		
	REFORÇO DO CONTOURNO DA CAVIDADE E/OU DO NÚCLEO POR MEIO DE TUBOS EM FIBRA DE VIDRO									●		
	INVERT				●	●	●	●	●	●	●	●
	PRÉ-CORTE						●		●			
	CONSOLIDAÇÕES RADIAIS A PARTIR DO TÚNEL PILOTO									●		
	JET-GROUTING							●				
	INJEÇÕES											●
	DRENAGENS			●	●	●	●	●	●		●	
ENFILAGENS			●									
FENÔMENOS DEFORMATIVOS		CENTIMÉTRICOS		DECIMÉTRICOS			INACEITÁVEIS					

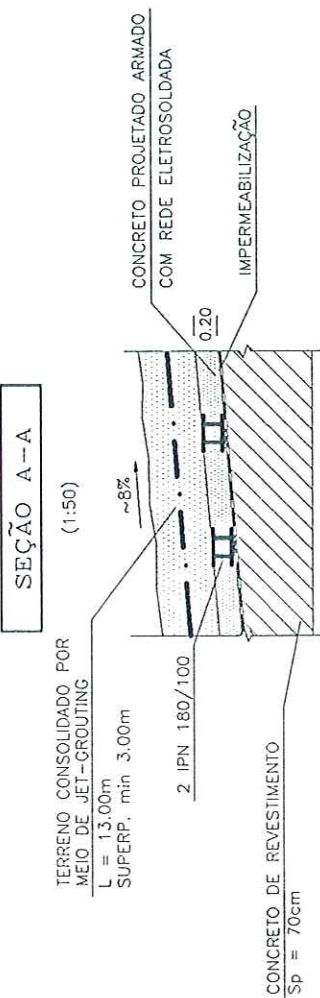
* ARMADURA CONSTITUÍDA POR CAMBOTAS E/OU REDE, ELETROSOLDADA E/OU FIBRAS DE AÇO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

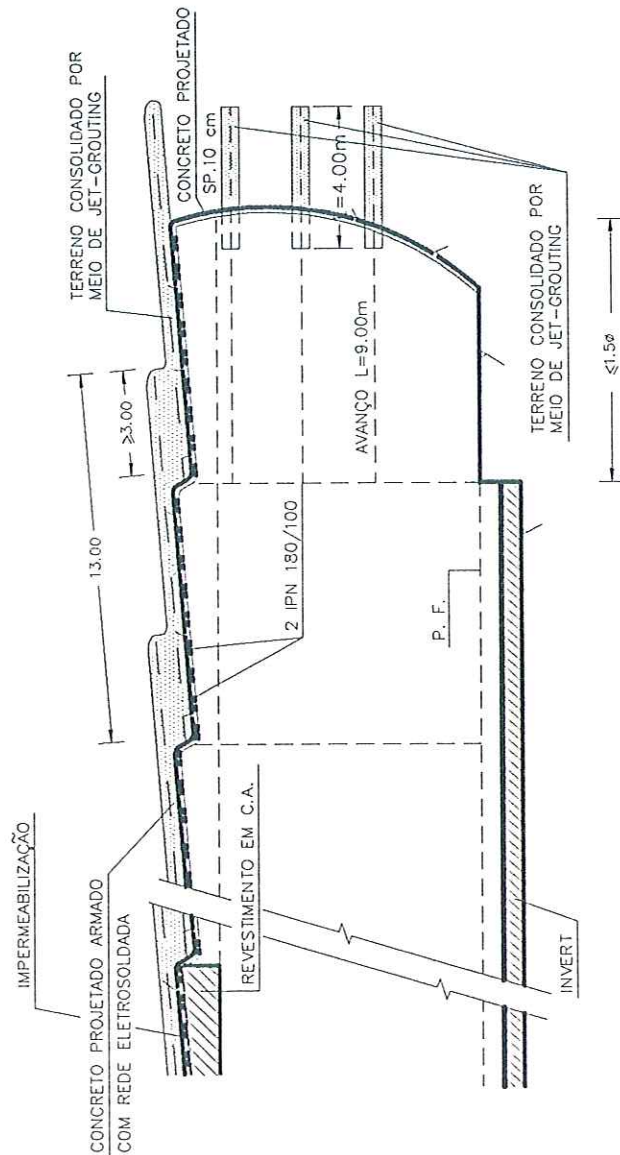
FIG.10

FASE DE
TERAPIA

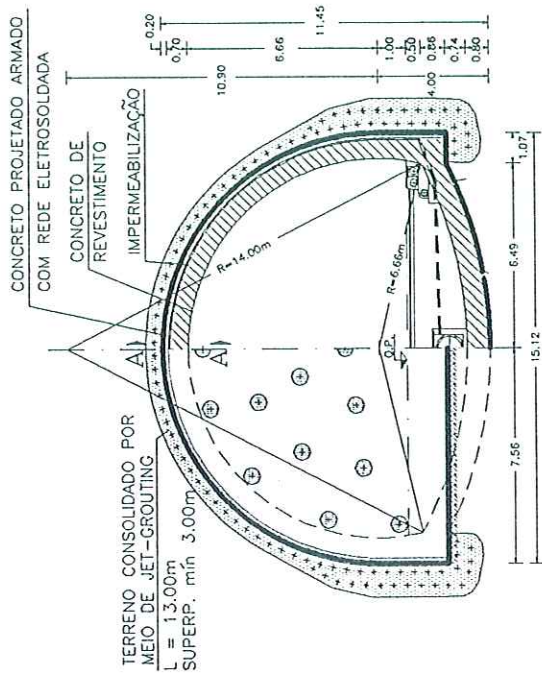
SEÇÃO TIPO C1 COM JET-GROUTING



PERFIL LONGITUDINAL



SEÇÃO TRANSVERSAL

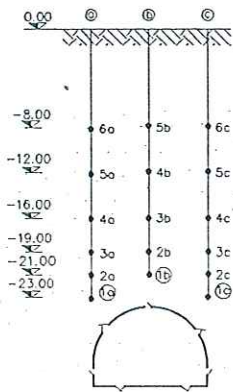
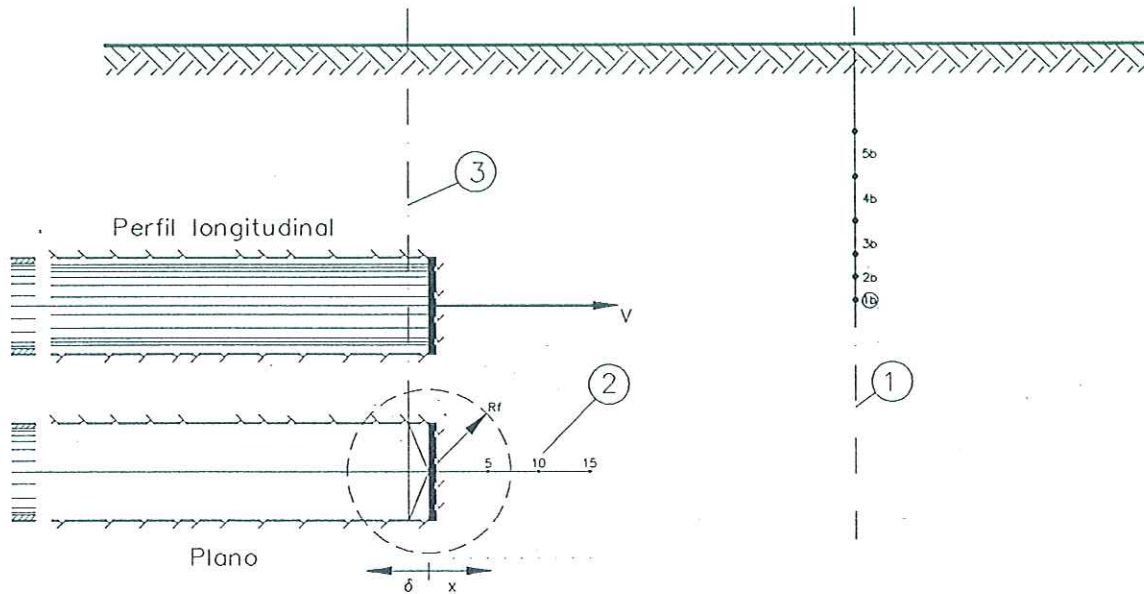


P. LUNARDI - MILANO

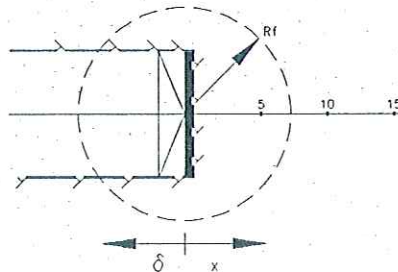
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

FIG.11

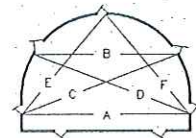
FASE DE VERIFICAÇÃO



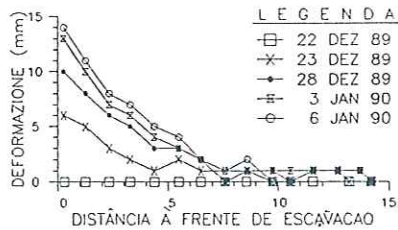
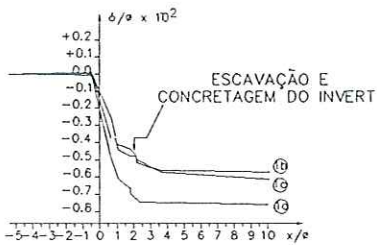
1



2

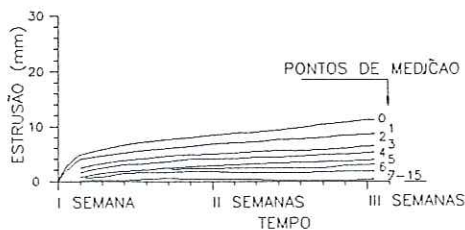
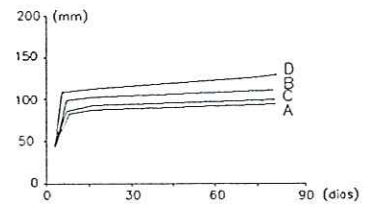


3



LEGENDA

- 22 DEZ 89
- × 23 DEZ 89
- 28 DEZ 89
- 3 JAN 90
- 6 JAN 90

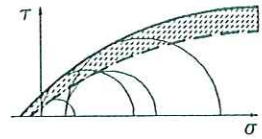


PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS SISTEMA ADECO-RS

FIG.12

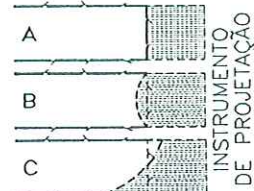
FASE DE
CONHECIMENTO

CARACTERIZAÇÃO DO MEIO
em termos de
mecânica das rochas e dos solos



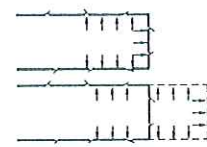
FASE DE
DIAGNOSTICO

DETERMINAÇÃO DAS CATEGORIAS DE COMPORTAMENTO
(A,B,C)
baseadas na previsão da estabilidade do núcleo
de avanço com métodos matemáticos
em ausência de intervenções de estabilização

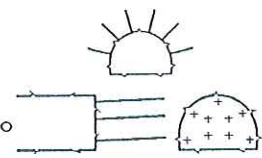


FASE DE
TERAPIA

ESCOLHA DO TIPO DE AÇÃO DE CONTENÇÃO OU DE
PRÉ-CONTENÇÃO A EXERCER
de acordo com as categorias de comportamento (A,B,C)



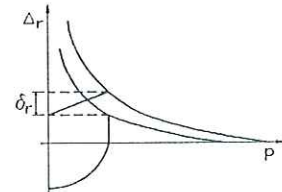
ESCOLHA DAS INTERVENÇÕES DE CONTENÇÃO E
PRÉ-CONTENÇÃO
baseada nos recentes progressos em campo tecnológico



COMPOSIÇÃO DAS SEÇÕES TIPO
longitudinais e transversais



DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DAS SEÇÕES TIPO
em termos de convergência-contenção,
extrusão-contenção e extrusão pré-contenção



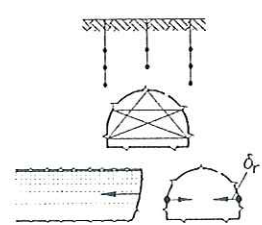
FASE
OPERATIVA

ACERTO DAS INTERVENÇÕES DE ESTABILIZAÇÃO
em termos de contenção e pré-contenção



FASE DE
VERIFICAÇÃO

CONTRÔLE DA EXATIDÃO DAS PREVISÕES FEITAS
EM FASE DE DIAGNÓSTICO E DE TERAPIA
através da leitura dos fenômenos deformativos
como resposta do meio durante
o avanço das escavações



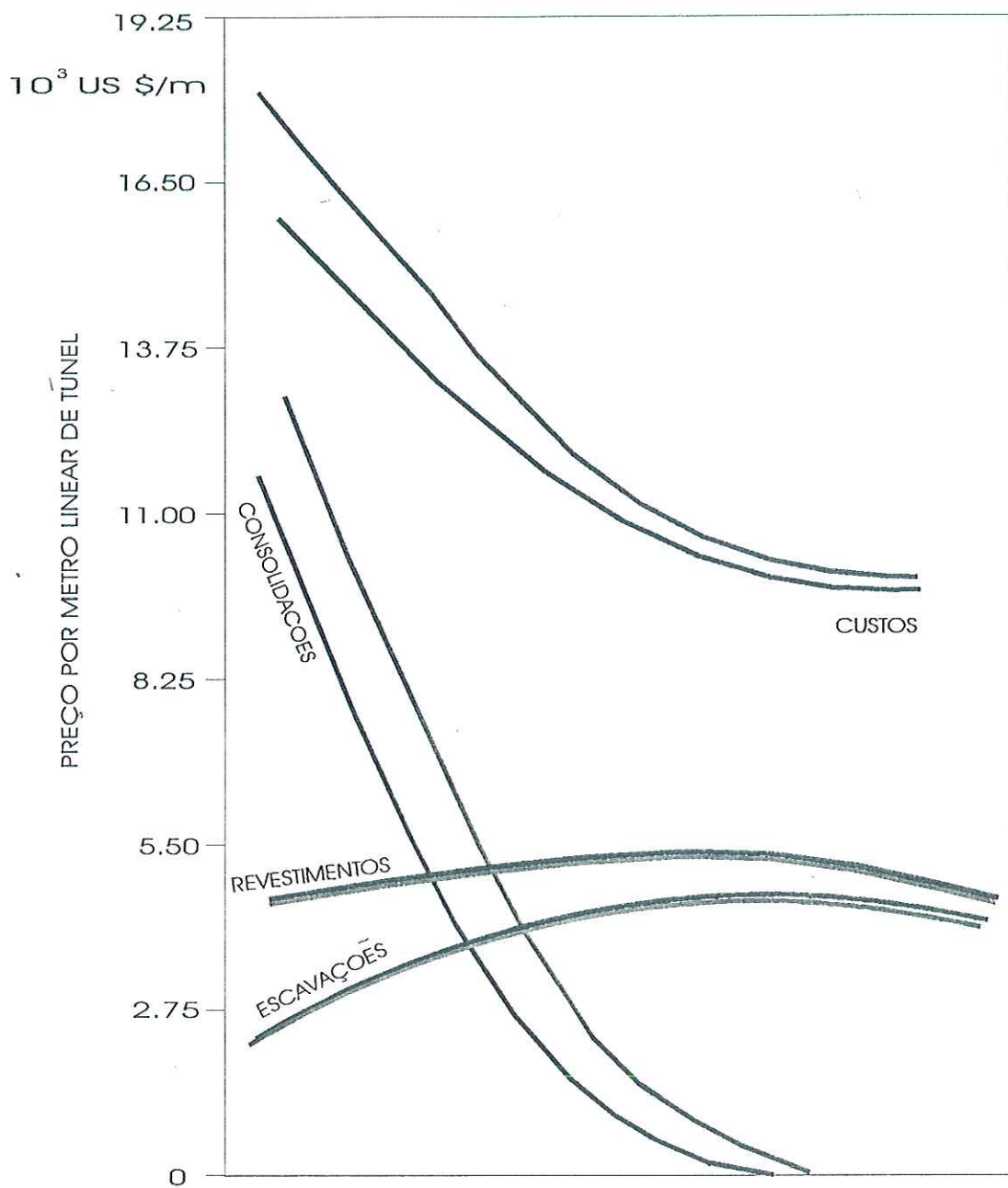
ACERTO DO PROJETO
por meio do balanceamento das intervenções
entre a frente e a cavidade

CONTRÔLE DA SEGURANÇA DO TÚNEL EM
FASE DE SERVIÇO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS
SISTEMA ADECO-RS

FIG. 13

CUSTOS UNITÁRIOS DOS TÚNEIS MALENCHINI E RIMAZZANO



FRETE	INSTÁVEL	ESTÁVEL A CURTO PRAZO	ESTÁVEL
-------	----------	-----------------------	---------

 PROJETO EXECUTIVO
 PROJETO COSTRUTIVO

RLUNARDI - CFMR.94