

# O MÉTODO ADECO-RS COMO GARANTIA DE RESPEITO DO PRAZO E CUSTOS NA REALIZAÇÃO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS

Pietro Lunardi<sup>1</sup>

A Itália, que é a nação do mundo juntamente com o Japão, que se orgulha do maior número de quilômetros de túneis construídos, há muitos anos abandonou completamente o método NATM a favor do método ADECO-RS. Adotando este método inovador e universal de projeção e construção, foram construídos centenas de quilômetros de túneis, e muitas vezes terminando com sucesso obras que com o método NATM foram abandonadas por terem sido consideradas aparentemente não realizáveis. A memória ilustra as evidências específicas que conduziram à definição do método ADECO-RS e os resultados muito significativos que até hoje foram alcançados em termos de produção, industrialização e segurança de escavações.

Keywords: ADECO-RS, NATM, industrialização

## GENERALIDADES

A ADECO-RS é um método universal de projeção e construção de obras subterrâneas, que se distingue de todos os anteriores por ter considerado desde o início como o objetivo, o respeito do prazo e dos custos da realização de obras, independentemente do sistema de escavação, mecânico ou convencional.

O respeito do prazo e dos custos de realização de obras, por outro lado, é o interesse comum de Administrações Públicas e Construtores e somente pode ser alcançado através da industrialização dos avanços.

Antes do surgimento da ADECO-RS, os problemas de industrialização podiam ser resolvidos apenas com a escavação mecanizada. Por vários anos, são de fato disponíveis diferentes tipos de TBMs, adequadas para escavar seja materiais rochosos que materiais muito moles acima ou abaixo do lençol freático.

Na Itália, por exemplo, operam ou operaram recentemente em contextos geomecânicos completamente diferentes, 10 TBMs, envolvidas na construção de túneis para metrô, ferrovias e rodovias, entre os quais recordamos, no difícil contexto geológico-geomecânico dos Apeninos, entre Bolonha e Florença, a TBM/EPB "Martina", atualmente a maior TBM/EPB do mundo com 15,62m de diâmetro (Fig. 1), que está escavando o túnel rodoviário "Sparvo". O avanço de todas estas obras, perfeitamente em linha com as previsões, confirmam a grande confiabilidade conseguida hoje pela escavação mecanizada.

Diferente e mais complexo é o tema da escavação convencional: todos nós conhecemos as dificuldades e os riscos que muitas vezes Administrações Públicas, Construtores, Projetistas e Mão-de-obra qualificada são obrigados a enfrentar quando terrenos, estados tensionais presentes, geometria das obras exigem escavações com sistemas convencionais.

Ainda hoje, é comum observar como situações muito delicadas são enfrentadas, como por exemplo escavações em solos moles, parcializando as seções com os mesmos critérios indicados no método NATM mais de 50 anos atrás. Prolongando esta situação, o que seria um grave atraso, não nos surpreenderia que continuassem a acontecer regularmente certos desastres como o de Pinheiros em 2007. Para garantir a industrialização das escavações de túneis mesmo quando somos obrigados a optar pela escavação convencional, trinta anos atrás na Itália, iniciou-se uma pesquisa teórica e experimental do comportamento tensão-deformação de um túnel em fase de escavação. Ao mesmo tempo, em base às evidências que surgiram dessa pesquisa, se experimentavam tecnologias de construção inovadoras (jet grouting horizontal, pré-corte mecânico a seção plena, reforço do núcleo-frente com armaduras em "fiberglass", etc) nos canteiros. Uma delas, o jet grouting horizontal na escavação de terrenos incoerentes, foi utilizada com sucesso pelo autor em Campinas (1987) na realização da passagem subterrânea rodoviária ao pátio ferroviário (Fig. 2).

Depois de ter verificado, durante a construção de alguns túneis, os novos princípios derivados dos resultados da pesquisa, muitas vezes em contraste com aqueles ensinados ainda hoje pelo método NATM, foram reunidos em uma nova concepção de projeção e de construção, denominada ADECO-RS, que tendo demonstrado efetivamente de



Figura 1. TBM EPB "Martina", Ø = 15,62 m

<sup>1</sup>Estudo da geoengenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

poder garantir a realização das obras, mesmo nas situações mais difíceis, em segurança e respeitando completamente os prazos e os custos previstos, foi rapidamente adotada nas especificações de todas as maiores Administrações italianas.

A Itália, vale lembrar, que é a nação do mundo juntamente com o Japão, que se orgulha do maior número de quilômetros de túneis construídos, e relativamente ao Japão tem certamente mais experiência de túneis escavados em terrenos difíceis com os sistemas convencionais. Nos últimos doze anos na Itália, usando o método ADECO-RS, foram construídos centenas de quilômetros de túneis, e muitas vezes terminando com sucesso obras que com o método NATM foram abandonadas por terem sido consideradas aparentemente não realizáveis. Os ótimos resultados suscitaram muito interesse no exterior, onde a aplicação da ADECO-RS resolveu rapidamente e com grande eficácia situações que pareciam sem esperança (ver túnel “Tartaiguille” na França - fig. 3). Adotar a ADECO-RS significa mudança de mentalidade, abandonando tabus e teorias que nunca foram provadas cientificamente, alterando as próprias especificações técnicas, como foi feito na Itália em 1990. É um esforço que mais cedo ou mais tarde cada País deverá considerar e que muitos (principalmente os orientais, atualmente muito atentos aos problemas da industrialização) já estão prestes a fazer, pois o livro sobre o sistema ADECO-RS lançado em edição italiana em 2006 já foi traduzido e publicado, em inglês, chinês e coreano, e atualmente está sendo traduzido em russo, alemão e espanhol.

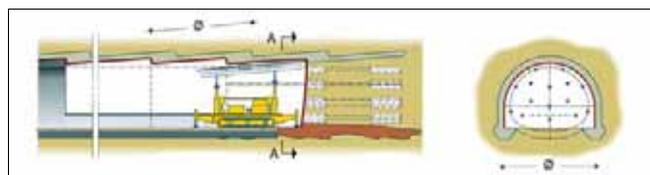


Figura 2. Proteção do núcleo-frente com jet-grouting horizontal à seção plena – Passagem subterrânea rodoviária do pátio ferroviário de Campinas ( $\varnothing = 14,9$  m, Terreno: areia, Cobertura 2 a 4 m)

#### A ADECO-RS

A ADECO-RS (Análises das deformações controladas nas rochas e nos solos) é uma filosofia de projeção que, ao contrário dos métodos do passado, concentra a projeção de uma obra subterrânea nas deformações que ocorrem no meio em que procede a escavação; analisando-las em detalhe e, em seguida, identificando os sistemas mais eficazes para controlá-las.

#### As deformações segundo a ADECO-RS

As deformações não são nada mais que a Resposta em deformação que o meio produz, como resultado da escavação, a qual se fosse nula, o projetista de túneis não teria mais emprego!

A ADECO-RS, por conseguinte, centra-se no estudo da Resposta em Deformação e para compreender as suas características, em termos de origem e evolução, considera (Fig. 4):

- o meio em que opera;
- a ação que se realiza nas operações de escavação;
- a reação (ou Resposta em Deformação) que é produzida no meio depois da escavação.

O meio é o terreno, isto é, o material de construção do túnel. Em profundidade é sujeito a um estado de tensões triaxiais, dependente das cargas litostáticas relacionadas às coberturas e à presença de agentes naturais. Do ponto de vista geológico a sua consistência natural (arenosa, argilosa ou rochosa) muda em profundidade, em função dos estados de tensão. Do ponto de vista geomecânico, o comportamento é caracterizado principalmente através



Figura 3. Túnel “Tartaiguille” (França), ( $\varnothing = 15,30$  m, Terreno: argilas dilatantes, Cobertura máx: 150 m.

Alguns comentários da imprensa técnica francesa: “Lorsqu’elle en prend les moyens, l’Italie peut réaliser des travaux à faire pâlir les entreprises françaises ...” (Le Moniteur, 20 fevereiro 1998);

“Le creusement du tunnel de Tartaiguille a été très difficile, en raison notamment de convergences inattendues du terrain, qui ont nécessité un changement de méthode en cours de chantier: le professeur italien Pietro Lunardi a convaincu la SNCF de travailler à la pelle en pleine section dans les argiles, en boulonnant le front sur 24 m ...” (Le Moniteur, 7 agosto 1998).

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

de provas de compressão simples, provas de cisalhamento e provas em célula triaxial.

A **ação**, que é produzida pelo avanço da frente de escavação que se move em um meio a uma determinada velocidade  $V$ , provoca uma perturbação nas tensões do terreno circundante seja na direção transversal que na direção longitudinal (portanto nas três dimensões), alterando os estados de tensão pré-existent.

Do ponto de vista do comportamento do túnel ao avanço da frente, é importante considerar o núcleo de avanço (fig. 5), definido como o volume de terreno que se encontra à montante da frente de escavação, com a forma praticamente cilíndrica e dimensões transversal e longitudinal da ordem de grandeza equivalente ao diâmetro do túnel: com a chegada da frente de escavação o núcleo de avanço passa de um estado de tensão triaxial a um estado biaxial ou uniaxial e após esta perturbação das tensões apresentará um comportamento estável, estável a curto prazo ou instável dependendo da ordem de grandeza das cargas litostáticas e dos campos de tensões existentes, e também da velocidade de avanço  $V$ , estreitamente ligada ao sistema de escavação utilizado (mecanizado ou convencional, à meia seção ou à seção plena): velocidades de avanço elevadas reduzem a propagação da perturbação, influenciando de forma significativa o comportamento do núcleo de avanço, ou seja, a Resposta em Deformação. Assim, notamos que a escolha do sistema de escavação condiciona diretamente a Resposta em Deformação do terreno à ação da escavação, portanto o sucesso da obra de engenharia em termos de prazos e custos de construção.

A **reação**, enfim, é a Resposta em deformação do terreno ao avanço da frente de escavação: segundo a ADECO-RS o projetista deve concentrar toda a sua atenção no seu estudo (previsão por via teórica em fase de projeção e verificação experimental ao longo da obra) em termos de análise e controle.

### A análise da Resposta em termos de Deformação segundo a ADECO-RS

Contrariamente ao método NATM, que identifica a Resposta em Deformação do meio à escavação apenas através da convergência, a ADECO-RS, em base às evidências obtidas com a pesquisa científica, reconhece três diferentes componentes da Resposta em Deformação (Fig. 6):

- a **extrusão**, identificada como componente primário, desenvolve-se principalmente no interior do núcleo de avanço e manifesta-se, em correspondência à superfície delimitada pela frente de escavação, no sentido longitudinal ao eixo do túnel, é medida experimentalmente por instrumentos especiais inseridos longitudinalmente ao núcleo de avanço (sliding micrometer);
- a **pré-convergência**, identificada como componente secundária da Resposta em Deformação na convergência do perfil teórico de escavação à montante da frente, é avaliada analiticamente através de um ábaco de pré-convergência;
- a **convergência**, identificada como a terceira componente da Resposta em Deformação na convergência do perfil teórico de escavação à jusante da frente de escavação; é medida experimentalmente por “tape extensometer” ou leituras topográficas mediante miras ópticas aplicadas ao perímetro da cavidade.

Segundo a ADECO-RS a convergência, portanto, é somente a última etapa de um fenômeno de deformação muito complexo, com origem à montante da frente de escavação sob a forma de extrusão e pré-convergência do núcleo de



Figura 4



Figura 5



Figura 6

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

avanço para depois evoluir à jusante do mesmo sob a forma de convergência da cavidade.

### O controle da Resposta em termos de Deformação segundo a ADECO-RS

Ao contrário do método NATM, que erroneamente propõe como solução de todos os problemas a parcialização da seção e a estabilização da escavação com chumbadores, cambotas, concreto projetado e inverts provisórios, operando apenas à jusante da frente de escavação, no interior da cavidade, a ADECO-RS prevê o avanço sempre em plena seção e estabiliza a escavação intervindo principalmente no terreno à montante da frente de escavação (fig. 7). Para este propósito a ADECO-RS utiliza como principal "instrumento de controle" à montante, o núcleo de avanço, adequadamente reforçado e/ou protegido se necessário, e como instrumento de controle à jusante, o completamento imediato do pré-revestimento com o invert, que deve ser realizado muito próximo da frente.

Operando na rigidez do núcleo de avanço com apropriadas intervenções de proteção e de reforço, evita-se de fato que com a chegada da frente de escavação se anulem a sollicitação principal menor  $\sigma_3$  e que, conseqüentemente, o núcleo de avanço passe de um estado de tensão triaxial para um biaxial ou uniaxial (fig. 8); desta forma é possível controlar a deformabilidade do núcleo de avanço e, por conseguinte, o surgimento e o desenvolvimento da Resposta em Deformação à montante da frente de escavação (extrusão, pré-convergência) e, conseqüentemente, também a sua evolução à jusante da mesma (convergência da cavidade).

É interessante notar como o próprio Rabcewicz, pai do método NATM, em muitos dos seus testes [Rabcewicz 1964 e 1965] exprimiu repetidamente a convicção de que todos os túneis, especialmente se difíceis, deveriam ser escavados à plena seção se existissem as tecnologias apropriadas. Quase um século depois, se conclui que embora atualmente existam as tecnologias que Rabcewicz esperava, os seus ex-alunos e seguidores, mais preocupados com o marketing do que com o desenvolvimento de pesquisas, não fizeram progressos na direção indicada pelo mestre, e limitaram-se a repetir as soluções que ele propôs a mais de 50 anos atrás, transformado o NATM em um método auto-referencial e sem futuro.

Acreditar, como ainda hoje ensina o NATM, que a solução para estabilizar um túnel em condições de tensão-deformação difíceis seja a parcialização e a concentração de todos os esforços somente no contraste da convergência, ou seja, na parte da Resposta em Deformação que se manifesta à jusante da frente de escavação, é uma ilusão. Desta forma, de fato, nunca foi possível evitar situações de colapso, por não ser possível manter a Resposta em Deformação sob controle, a qual, ao contrário, devemos tolerar. A convergência, como "última etapa" de um processo de deformação muito complexo com origem à montante da frente de escavação, é de fato um fenômeno incontrolável, ligado à plastificação do terreno no contorno da cavidade, que, como sabemos, não é possível inverter quando se propaga significativamente. A ADECO-RS, tendo compreendido a verdadeira origem e evolução da Resposta em Deformação, concentra todos os esforços no controle da extrusão (núcleo de avanço como novo instrumento de estabilização), que, sendo a "etapa inicial" e fonte do processo de deformação, se mantida adequadamente em campo elástico, evolui em fenômenos de pré-convergência e convergência também esses em campo elástico, permitindo assim a redução das pressões sobre os revestimentos ao mínimo, a curto e a longo prazo.

Para fornecer ao projetista de túneis instrumentos adequados para controlar a Resposta em Deformação, a ADECO-RS, após a análise da estabilidade do núcleo-frente do túnel com modelos experimentais e matemáticos, refere-se ao núcleo de avanço, considerado como o principal instrumento de estabilização da escavação, identificando três categorias de comportamento tensão-deformação fundamentais (fig. 9):



Figura 7



Figura 8

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

- categoria A ou comportamento núcleo-frente estável
- categoria B ou comportamento núcleo-frente estável a curto prazo
- categoria C ou comportamento núcleo-frente instável.

É claro que para garantir a estabilização a curto e longo prazo de um túnel durante a escavação devemos reconduzir os comportamentos tipo B e C à categoria A, interferindo, primeiramente, na rigidez do núcleo de avanço. Este é o objetivo principal do projetista que pode realizá-lo com sucesso operando no núcleo de avanço com intervenções conservativas adequadas de pré-contenção da cavidade, de reforço ou de proteção, e, em seguida, à jusante da frente de escavação, o modo de extrusão do núcleo-frente, mediante intervenções conservativas de contenção da cavidade, tais como o completamento e enrijecimento do revestimento de primeira fase, próximo da frente de escavação, com o invert (fig. 10).

### Tecnologias de controle da Resposta em termos de Deformação à montante da frente de escavação segundo a ADECO-RS

Dado que as intervenções podem ser:

- de reforço, quando agem diretamente na consistência do núcleo de avanço, melhorando as suas características naturais de resistência e deformabilidade através de técnicas adequadas de consolidação;
- de proteção, quando produzem a canalização das tensões na parte externa do núcleo de avanço fazendo, na verdade, uma ação protetora, que garante a conservação das suas características naturais de resistência e deformabilidade;

Entre as tecnologias conservativas de reforço do núcleo-frente capazes de desempenhar uma ação eficaz de controle da Resposta em Deformação à montante da frente de escavação, recordamos:

- o reforço do núcleo-frente mediante os elementos estruturais de “fiberglass”, concebidos pelo autor e testados na Itália pela primeira vez na aplicação de tunneling em 1985, durante a realização de um breve túnel hidráulico de 5 m de diâmetro no vertedouro de fluxo “Citronia” em “Salsomaggiore Terme” (Itália) e desde então usado com grande sucesso na escavação em seção plena de túneis em solos macios com mais de 20 m de diâmetro de escavação (Túnel “Appia Antica”, GRA - Roma na Figura 11).

Entre as tecnologias conservativas de proteção do núcleo-frente capazes de desempenhar uma ação eficaz de controle da Resposta em Deformação à montante da frente de escavação, merece uma menção especial:

- o pré-corte mecânico a plena seção, concebido pelo autor e testado pela primeira vez no mundo em 1985 na Itália, durante a realização de um túnel realizado em argila muito mole na linha férrea “Sibari-Cosenza” entre as estações de “S. Marco Roggiano” e “Mongrassano-Cervicati”. A tecnologia também foi aplicada com sucesso na escavação de túneis de estação do metrô em terrenos coerentes (Estação

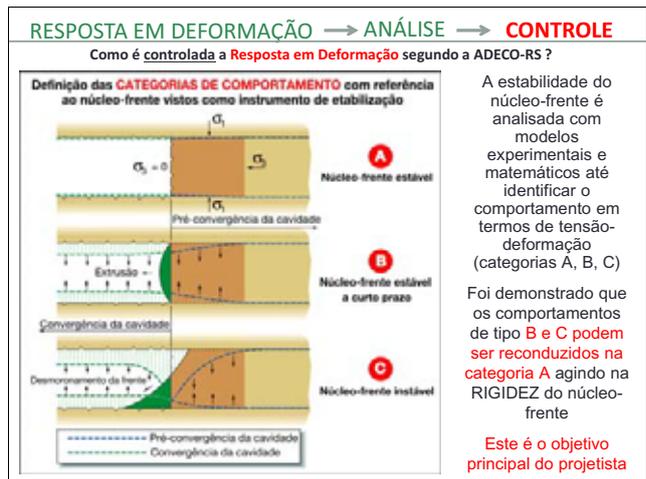


Figura 9



Figura 10

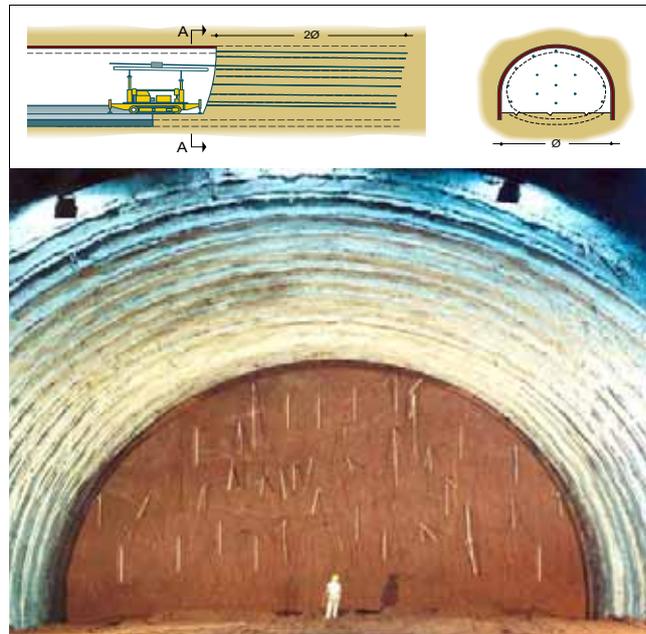


Figura 11. Reforço do núcleo-frente com agulhamento em “fiberglass” – Túnel “Appia Antica” - ( $\varnothing = 20,65$  m, Terreno: piroclásticas, Cobertura:  $4 \div 18$  m)

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

“Baldo degli Ubaldi” da linha A do metrô de Roma na Fig. 12, terreno: argilas, diâmetro de escavação: 21,5 m, cobertura: 15-18 m).

Entre as tecnologias conservativas de proteção / reforço do núcleo-frente capazes de desempenhar uma ação eficaz de controle da Resposta em Deformação à montante da frente de escavação, recordamos finalmente:

- o jet-grouting horizontal a plena seção, concebidos pelo autor e testado pela primeira vez no mundo na Itália em 1983, durante a realização do túnel "Campiolo", na linha férrea a dupla via “Udine-Tarvisio”, em detritos e com coberturas variáveis de 0 a 70 m. A mesma tecnologia, como mencionado anteriormente, foi utilizada em Campinas em 1987, (fig. 17), na realização da passagem rodoviária subterrânea em dupla via ao pátio ferroviário existente (terreno: areias heterogêneas, diâmetro de escavação: 14,9 m, cobertura variável entre 2 e 6 m).

Em relação ao controle da Resposta em Deformação à montante da frente de escavação, é também importante salientar como a ADECO-RS, a fim de favorecer sempre a formação de “efeitos arco” longitudinais no terreno, considera fundamental manter constantemente a forma côncava na superfície exposta da frente de escavação durante o avanço (Fig. 13)

#### **Tecnologias de controle da Resposta em termos de Deformação à jusante da frente de escavação segundo a ADECO-RS**

Em relação ao controle da Resposta em Deformação à jusante da frente de escavação a ADECO-RS insiste na necessidade do projetista de haver muita atenção na transição entre a ação de pré-contenção da cavidade efetuada à montante da frente de escavação e a de contenção da cavidade efetuada à jusante da mesma, que deve ser efetuada com coerência e continuidade.

Isto significa que contrariamente à prática ensinada pelo método NATM, que ignorando a verdadeira origem da Resposta em Deformação permite que esta se desenvolva à montante da frente de escavação forçando em seguida, a realização de revestimentos flexíveis que suportem os fenômenos de deformação já iniciados (uma prática que em condições de tensão-deformação críticas, só pode provocar desastres), a ADECO-RS requer necessariamente a execução de revestimentos gradualmente rígidos, considerando que o avanço é executado em presença de um núcleo enrijecido.

Para este efeito, é fundamental que o completamento do revestimento com o invert à jusante da frente de escavação seja realizado o mais próximo possível da frente quanto mais importante é a intervenção de enrijecimento que efetuamos no núcleo de avanço (Fig. 10).

Esta necessidade é muitas vezes de difícil compreensão aos construtores, porque exige uma organização diferente do canteiro de obras respeito aos maus hábitos adquiridos no passado. É uma clara evidência que surgiu através da observação atenta e também da interpretação numérica dos eventos de desabamentos que ocorreram no passado,

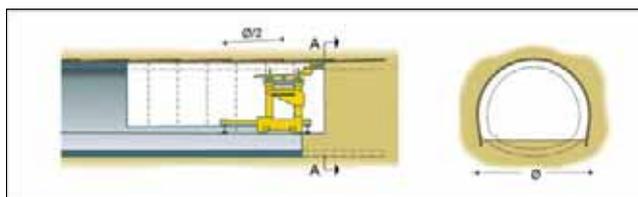


Figura 12. Pré-corte mecânico – Túnel da estação “Baldo degli Ubaldi” - ( $\varnothing = 21,5$  m, Terreno: argilas, Cobertura:  $15 \div 18$  m)



Figura 13. Frente de escavação com forma côncava – Túnel da estação “Baldo degli Ubaldi” - ( $\varnothing = 21,5$  m, Terreno: argilas, Cobertura:  $15 \div 18$  m)

<sup>1</sup>Estudo da geoengenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

e das modalidades de evolução da Resposta em Deformação que os precederam.

Em particular, vimos que quando o fenômeno de extrusão se manifesta, é através de uma superfície ideal, definida superfície de extrusão, que se estende desde o ponto de contato entre o terreno e a extremidade superior do pré-revestimento, até o ponto de contato entre o mesmo terreno e a extremidade do invert (Fig. 14). O levantamento do fundo da escavação que ocorre em condições difíceis na escavação a meia seção, não é a deformação de convergência como se acredita geralmente, mas o resultado de uma Resposta em Deformação regularizada incorretamente na sua componente extrusiva.

A aproximação do invert à frente de escavação, reduzindo progressivamente a superfície de extrusão, produz uma redução igualmente progressiva do fenômeno de extrusão (que se manifesta com uma forma mais simétrica ao longo da vertical da frente) e, portanto, também de pré-convergência e convergência.

A partir da observação da Figura 14, que ilustra graficamente a descrição acima, é absolutamente evidente que a realização do invert distante da frente de escavação seria como aumentar a extensão da superfície de extrusão, com conseqüências análogas ao avanço à meia seção.

Como mostram as fotografias na fig. 15, realizar o invert muito perto da frente é possível, e uma adequada organização do canteiro não prejudicaria a produção fornecendo ao contrário um aumento significativo da segurança.

### Projeção e construção de um túnel segundo a ADECO-RS

Vimos que a ADECO-RS (análises das deformações controladas nas rochas e nos solos) concentra a atenção do projetista na análise e no controle da Resposta em Deformação, considerada como a reação do meio à ação da escavação, e que a rigidez do núcleo de avanço é o instrumento natural de controle da extrusão e, portanto, da pré-convergência e da convergência da cavidade, componentes da própria Resposta em Deformação, a qual, como é conhecido, condiciona a industrialização da escavação e, conseqüentemente, o respeito dos prazos e dos custos de construção.

Neste contexto, a análise e o controle da Resposta em Deformação, desempenham uma função fundamental e indispensável na projeção e construção correta de uma obra-subterrânea :

- a análise, dedicada à previsão dos fenômenos deformativos que ocorrerão após a escavação, deve ser feita teoricamente, usando os instrumentos de cálculo analítico ou numérico, do "momento de projeção", durante o qual em base às previsões feitas, o projetista também faz as escolhas necessárias em termos de sistemas, fases, ritmo de escavação, instrumentos de consolidação e de estabilização;
- o controle da Resposta em Deformação, ao invés, ocorre no "momento de construção", quando, seguindo com a escavação, as escolhas projetuais são feitas e verificadas através da medição da Resposta em Deformação do meio às ações atuantes.

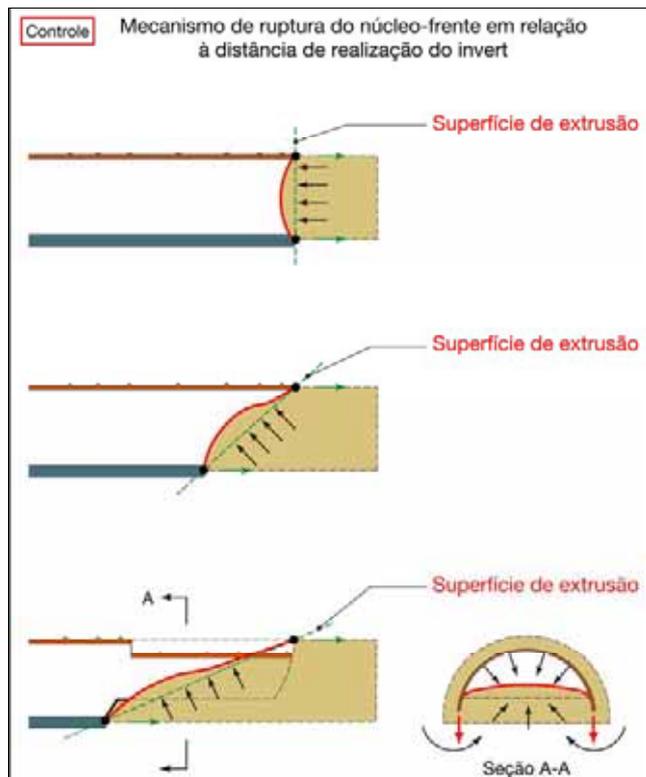


Figura 14. Distanciar o invert da frente de escavação significa aumentar a superfície de extrusão



Figura 15. Invert realizado próximo à frente de escavação - Túnel "Raticosa" ( $\varnothing = 13,90$  m, Terreno: argilas escamosas, Cobertura: 500 m) e túnel "Tartaiguille" ( $\varnothing = 15,30$  m, Terreno: argilas dilatantes, Cobertura máx: 150 m).

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

Segue-se que para projetar e construir corretamente uma obra subterrânea é fundamental:

- em fase de projeto:
  - conhecer profundamente o meio no qual se deverá operar em termos de geologia e geomecânica, com particular atenção às suas características de resistência e de deformabilidade;
  - estudar previamente qual será o comportamento tenso-deformativo (Resposta em Deformação) deste meio à escavação, na ausência de intervenções de estabilização;
  - definir o tipo de ação de pré-contenção e de contenção necessária para regularizar e controlar a Resposta em 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;
  - compor, 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, prevendo também o comportamento em termos de tensão-deformação após a estabilização da mesma;

Momento	Fase	Argumento
Projeção	- Conhecimento	- Análise dos equilíbrios naturais pré-existentis
	- Diagnóstico	- estudo e previsão da resposta em deformação (*) em ausência de intervenções de estabilização (identificação das categorias de comportamento (A, B, C))
	- Terapia	- Controle da resposta em deformação (*) na escolha de sistemas de estabilização [de acordo com as categorias de comportamento (A, B, C)]
Construção	- Operativa	- Aplicação dos instrumentos de estabilização no controle da resposta em deformação (*)
	- Verificação	- Controle e leitura da resposta em deformação (*) como resposta do maciço durante o avanço das escavações (medição da extrusão do núcleo-frente e das convergências superficiais e profundas da cavidade)
	- Acerto do projeto	- Interpretação da resposta em deformação (*) e confronto com a previsão teórica durante o momento de projeção - Balanceamento dos sistemas de estabilização entre o núcleo-frente e o perímetro da cavidade

(\*) Resposta em deformação em termos de extrusão do núcleo-frente e das convergências superficiais e profundas da cavidade

Figura 16.

- em fase de construção:
  - verificar, durante a construção, que o comportamento do túnel 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 o núcleo-frente e o perímetro da cavidade.

Portanto, para enquadrar o projeto e a construção de obras subterrâneas de modo correto e universalmente válido, o método ADECO-RS prevê que eles se articulem em dois momentos cronologicamente distintos (fig. 16):

- um momento de projeção que inclui:
  - uma fase de conhecimento, que se refere ao conhecimento geológico, geomecânico e hidrogeológico do meio e à análise dos equilíbrios naturais pré-existentis;
  - uma fase de diagnóstico, que se refere à análise e a previsão, por via teórica, do comportamento do meio em termos de Resposta em Deformação, em ausência de intervenções de estabilização, em função das condições de estabilidade do núcleo-frente (categorias A, B e C);
  - uma fase de terapia, que se refere, inicialmente à definição das modalidades de escavação e estabilização do meio a fim de regularizar, de acordo com as categorias de comportamento A, B e C, a Resposta em Deformação e depois a avaliação, por via teórica, da eficácia das soluções adotadas; nesta fase se compõem as seções tipo prevendo a aplicação e as variações possíveis, em função do comportamento deformativo real do túnel em fase de escavação que será medido em fase operativa;
- um momento de construção que inclui:
  - uma fase operativa, relativa à efetiva construção do túnel, na qual são aplicados os instrumentos de estabilização para o controle da Resposta em Deformação;



Figura 17

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

- uma fase de verificação e acerto do projeto durante a construção, relativa à medição e à interpretação experimental do comportamento real do meio de escavação em termos de Resposta em Deformação, para o acerto e o balanceamento, entre o núcleo-frente e o perímetro de escavação, dos sistemas de estabilização utilizados e para a verificação das soluções pré-escolhidas, comparando as deformações reais com as previstas.

Em contraste com o método NATM, o projeto é, então, verificado e calibrado durante a construção, comparando cada um dos parâmetros homogêneos (Resposta em Deformação prevista pelo cálculo com a Resposta em Deformação medida durante a construção). Os erros, para não dizer horrores, são evitados, como por exemplo comparar, durante a construção de um túnel, as convergências medidas em fase de avanço com intervalos de convergência combinados arbitrariamente a classes geomecânicas (fig. 17).

### 100 KM DE TÚNEIS ATRAVÉS DOS APENINOS

Mais de 100 km de túneis escavados entre 1996 e 2005, no trecho Bologna - Florença na nova linha ferréa a alta velocidade Milão-Roma-Nápoles é um grande exemplo de aplicação do método ADECO-RS e a sua capacidade de conseguir a industrialização completa da escavação em solos muito difíceis pela sua natureza ou pelos campos de tensão atuantes (fig. 18).

O comprimento total do traçado é superior a 78,5 km dos quais 70,6 (aproximadamente 90% do comprimento total) em túneis com dupla via.

O projeto inclui a construção de:

- 9 túneis de linha, com seção de aproximadamente 140 m<sup>2</sup> e comprimento que varia de 528 m a 16.775m;
  - 14 túneis de acesso por um total de 9.255 m;
  - 1 túnel de serviço por um total de 10.647 m;
  - 2 túneis de interligação + by-pass por um total de 2.160 m;
- por um total de cerca de 104 km de túnel a ser escavado.

O projeto executivo e construtivo de todas estas obras foram realizados baseado no método ADECO-RS. O projeto e construção foram, portanto, desenvolvidos em dois momentos bem separados a partir do ponto de vista cronológico, ou seja, através de:

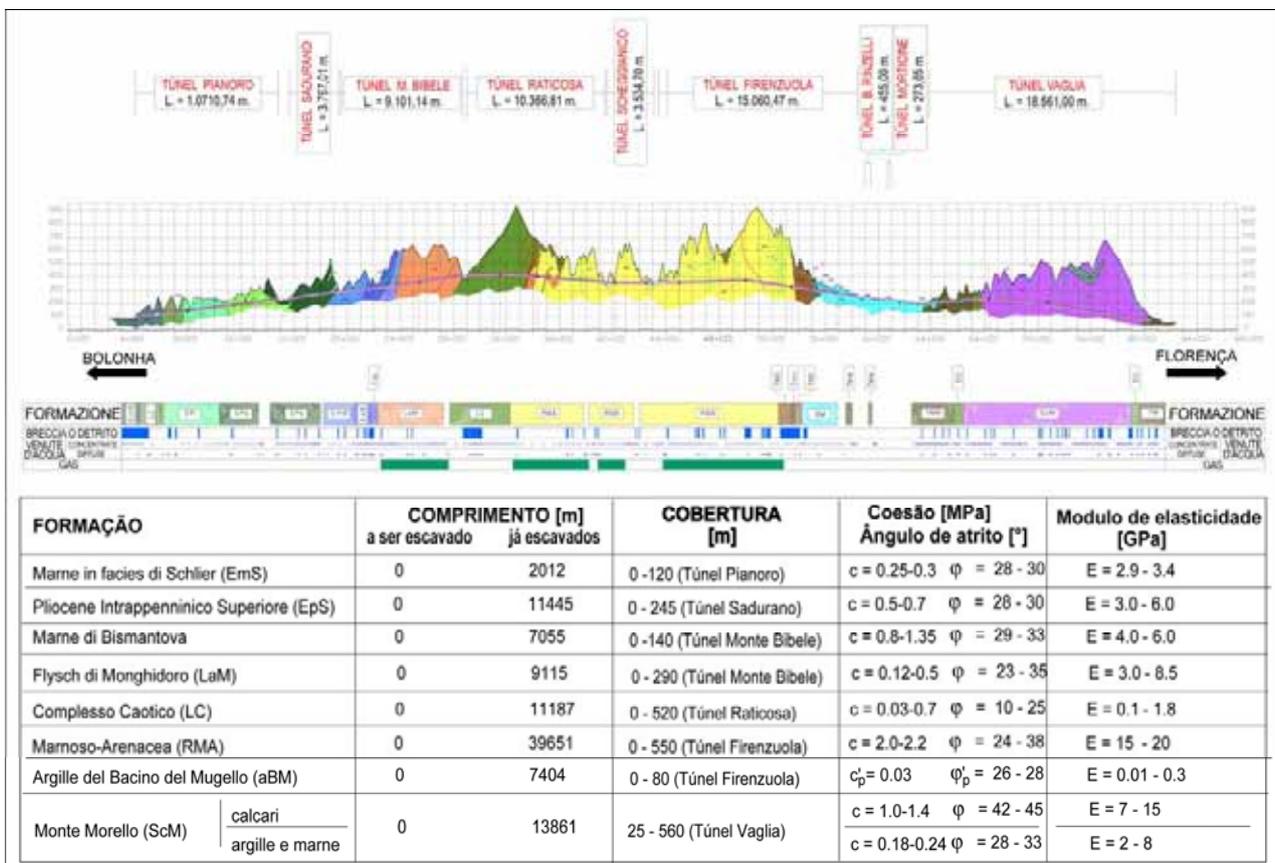


Figura 19. A variabilidade de parâmetros de resistência e de deformabilidade das formações principais

<sup>1</sup>Estudo da geotecnologia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

- uma fase de conhecimento, uma fase de diagnóstico e uma fase da terapia, no momento da projeção;
- uma fase operativa e uma fase de verificação durante a obra, no momento da construção.

### Projeção de obras

#### *Classificação geológica e geotécnica (fase de conhecimento)*

A considerável complexidade dos terrenos envolvidos na realização da linha férrea "Diretíssima" (inaugurada em 1934), já abordada com grande dificuldade, era bem conhecida. Na realização da campanha geognóstica em fase de projeto executivo da nova linha Alta Velocidade/Alta Capacidade (AV/AC) foi decidido o investimento de uma soma aproximada de 84 milhões de Euros, 2% do valor total da obra. Isso possibilitou uma caracterização geológico-geomecânica dos terrenos que seriam envolvidos na escavação dos túneis, suficientemente detalhada e principalmente realista.

Como mostrado na fig. 19, trata-se principalmente de formações flyshióides, argilas, xistos e solos incoerentes, contendo às vezes aquíferos importantes, presentes em mais de 70% do traçado subterrâneo, com coberturas variando de 0 a 600 m. Algumas formações apresentaram também o problema da presença de gás (situação sempre muito delicada). Com base no conhecimento adquirido na fase de conhecimento, o traçado foi dividido em trechos com características geológicas e geomecânicas semelhantes, nos quais foram atribuídos os parâmetros de resistência e de deformabilidade utilizados nas sucessivas análises de diagnóstico e terapia.

#### *Previsão do comportamento tensão-deformação do maciço à escavação (fase de diagnóstico)*

Com base nos conhecimentos geológicos, geotécnicos, geomecânicos e hidrogeológicos recolhidos e nos resultados de cálculo de estabilidade realizados com métodos analíticos e/ou numéricos em fase de diagnóstico, o traçado subterrâneo foi dividido em trechos de comportamento tensão-deformação uniformes, em função da estabilidade prevista do núcleo-frente em ausência de intervenções de estabilização:

- núcleo-frente estável (categoria de comportamento A; fenômenos deformativos em campo elástico, instabilidades principais: destaques gravitativos na frente e ao contorno da cavidade);
- núcleo-frente estável a curto prazo (categoria de comportamento B; fenômenos deformativos em campo elastoplástico; instabilidades principais: deslocamentos na frente e ao contorno da cavidade);
- núcleo-frente instável (categoria de comportamento C; fenômenos deformativos em campo da ruptura, instabilidades principais: desmoronamento da frente e colapso da cavidade).

Esta análise mostrou que em 17% do traçado, a escavação seria efetuada em maciços que teriam um comportamento de categoria A, 57% seriam previsivelmente afetados por fenômenos deformativos em campo elastoplástico relacionados com a categoria de comportamento B, cerca de 26%, finalmente, apresentariam, em ausência de intervenções apropriadas, graves fenômenos de instabilidade do núcleo-frente típicos da categoria de comportamento C.

#### *Definição de sistemas de escavação e intervenções de estabilização (fase de terapia)*

Após efetuar previsões confiáveis para o comportamento tenso-deformativo do maciço depois da escavação, foram identificados para cada trecho do túnel com um comportamento tensão-deformação uniforme, as ações (de pré-contenção e/ou contenção simples) necessárias para garantir, em cada situação prevista, a formação de um "efeito arco", o mais próximo possível ao perfil da escavação. Conseqüentemente, foram projetadas as metodologias de avanço (sistema de abatimento, profundidade dos campos) e as intervenções mais adequadas para a produção de tais ações e assegurar, como resultado, a estabilidade e a segurança das escavações no curto e longo prazo.

Devido à variabilidade dos terrenos, mais ou menos presentes em todos os túneis, não foi possível adotar tecnologias de escavação totalmente mecanizada, com a exceção do túnel de serviço do túnel "Vaglia"; os princípios informativos nos

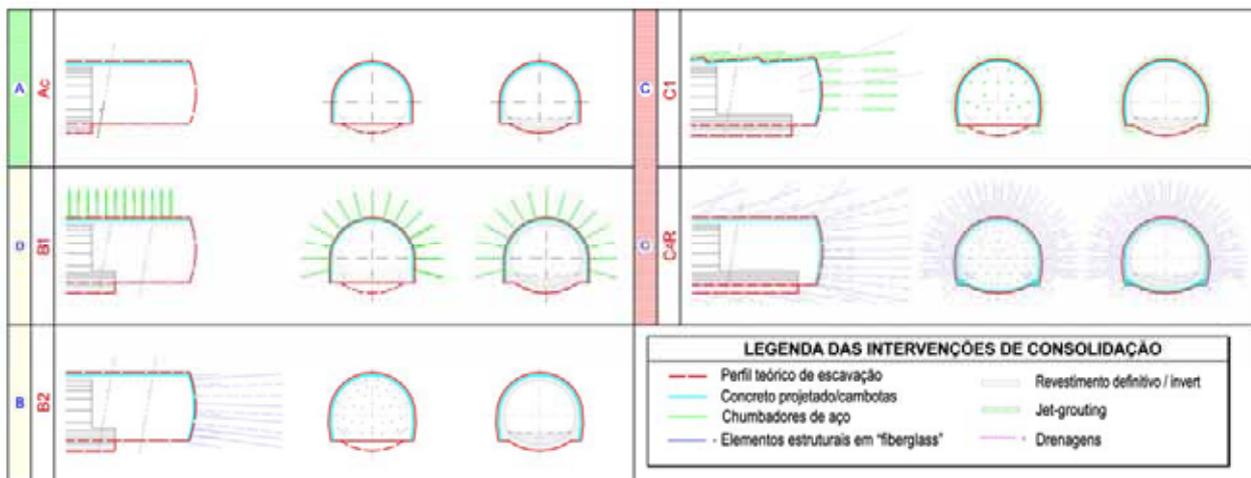
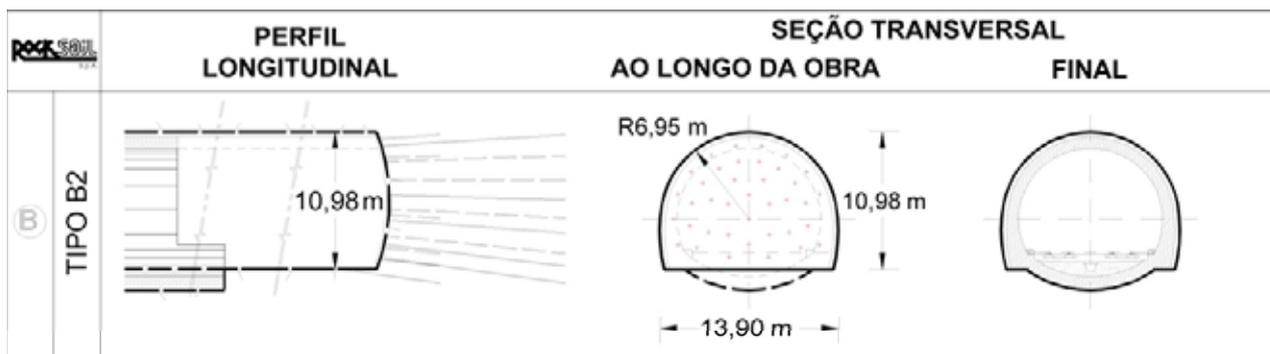


Figura 20. As seções tipo principais.

<sup>1</sup>Estudo da geoengenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)



GEOLOGIA	GEOMECÂNICA	COBERTURA		SEÇÃO TIPO PROJETADA			RESPOSTA EM DEFORMAÇÃO PREVISTA		VARIÁÇÕES	
		de	por	Intervenções	1ª FASE	DEFINITIVO	Intervenções	1ª FASE	DEFINITIVO	
Matriz areno-siltosas compacta ou não, bem estratificada de levemente a moderadamente cimentadas. Baixa permeabilidade	$\varphi = 14 + 32$ $c = 0,25 + 0,5 \text{ MPa}$ $E = 0,5 + 3,0 \text{ GPa}$	50	100	B2	Nº 45 elementos estruturais em "fiberglass" no núcleo-frente, sobreposição > 5,00 m Cambotas de aço, passo 1,20 m Concreto projetado, espessura 30 cm	Revestimento de concreto, espessura 90 cm Invert, espessura 100 cm	<10cm	5+18cm	Nº 35 + 55 elementos estruturais em "fiberglass" no núcleo-frente, sobreposição 5 + 7 m Cambotas de aço, passo 1,20 + 1,40 m Concreto projetado, espessura 25 + 30 cm	Revestimento de concreto, espessura 90 cm Invert, espessura 100 cm

Figura 21. Exemplo das variabilidades projetadas em função do comportamento real do maciço à escavação.

quais se baseia o projeto das seções tipo para os túneis de linha foram os seguintes:

- avanço sempre a plena seção, especialmente em condições difíceis de tensão-deformação: graças às vantagens estáticas da mesma e à forte mecanização, possível pela disponibilidade de grandes espaços no canteiro de obras. A aplicação da escavação a plena seção após a pré-consolidação do núcleo-frente, quando necessário, faz com que seja possível o avanço em condições de segurança obtendo produções excelentes e sempre regulares, mesmo nas situações mais complexas;
- contenção, se necessária, das alterações e da descompressão do terreno causada pela escavação através da aplicação imediata de eficazes intervenções de reforço e/ou proteção do núcleo de avanço;
- realização de um revestimento definitivo em concreto, eventualmente armado, completo com a realização do invert, e quando for necessário bloquear prontamente os fenômenos deformativos próximos da frente, em porções de comprimento reduzido.

Foram individuadas, portanto, as seções tipo longitudinais e transversais (um total de 14) mais adequadas para enfrentar diversas condições de maciço, definindo claramente, para cada uma delas, as condições geológico-geomecânicas e tenso-deformativas (extrusões e convergências) em que cada uma deverá ser aplicada, também a posição em relação à frente de escavação, a intensidade, as fases e as cadências de aplicação das diferentes intervenções previstas (pré-consolidação, pré-revestimento, invert, etc.), supondo, em relação às experiências anteriores já suficientemente numerosas, um tempo de ciclo de execução muito confiável, de modo a prever com precisão suficiente a produção diária possível (fig. 20). Para cada seção tipo foram concebidas as variabilidades aplicáveis simultaneamente em situações estatisticamente prováveis, cuja localização ao longo do traçado, porém, não era previsível com base nos dados disponíveis (ver exemplo na fig. 21).

A determinação preventiva, para cada tipo de seção, das variabilidades admitidas em função do comportamento real manifestado pelo maciço à escavação, sempre dentro dos campos de deformação previstos, é uma operação fundamental prevista pelo método ADECO-RS, que permite alcançar um alto nível de definição do projeto e, simultaneamente, a flexibilidade necessária para adotar, durante a construção (sem tirar o valor dos princípios básicos), o Sistema de Garantia da Qualidade em conformidade com as normas ISO 9001. Desta forma, com efeito, evitamos que a cada variação nas condições encontradas implique modificações, mesmo se pequenas, no projeto e surjam "Não-Conformidades" (isto é, diferença entre o projetado eo construído), que exigiria uma reprojetação parcial.

Cada seção tipo foi verificada em função das cargas mobilizadas (identificadas na fase de diagnóstico) pela escavação, tanto em relação às varias fases de construção, quanto na fase final de exercício, mediante uma série de cálculos de modelos a elementos finitos planos e tridimensionais em campo elastoplástico.

Finalmente, foram formuladas indicações exatas de atuação de um programa de monitoragem adequado, que em função das diferentes características dos terrenos atravessados, pôde, por um lado, garantir a segurança das escavações, por outro lado, verificar a adequação do projeto e sua otimização em relação às condições encontradas realmente.

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

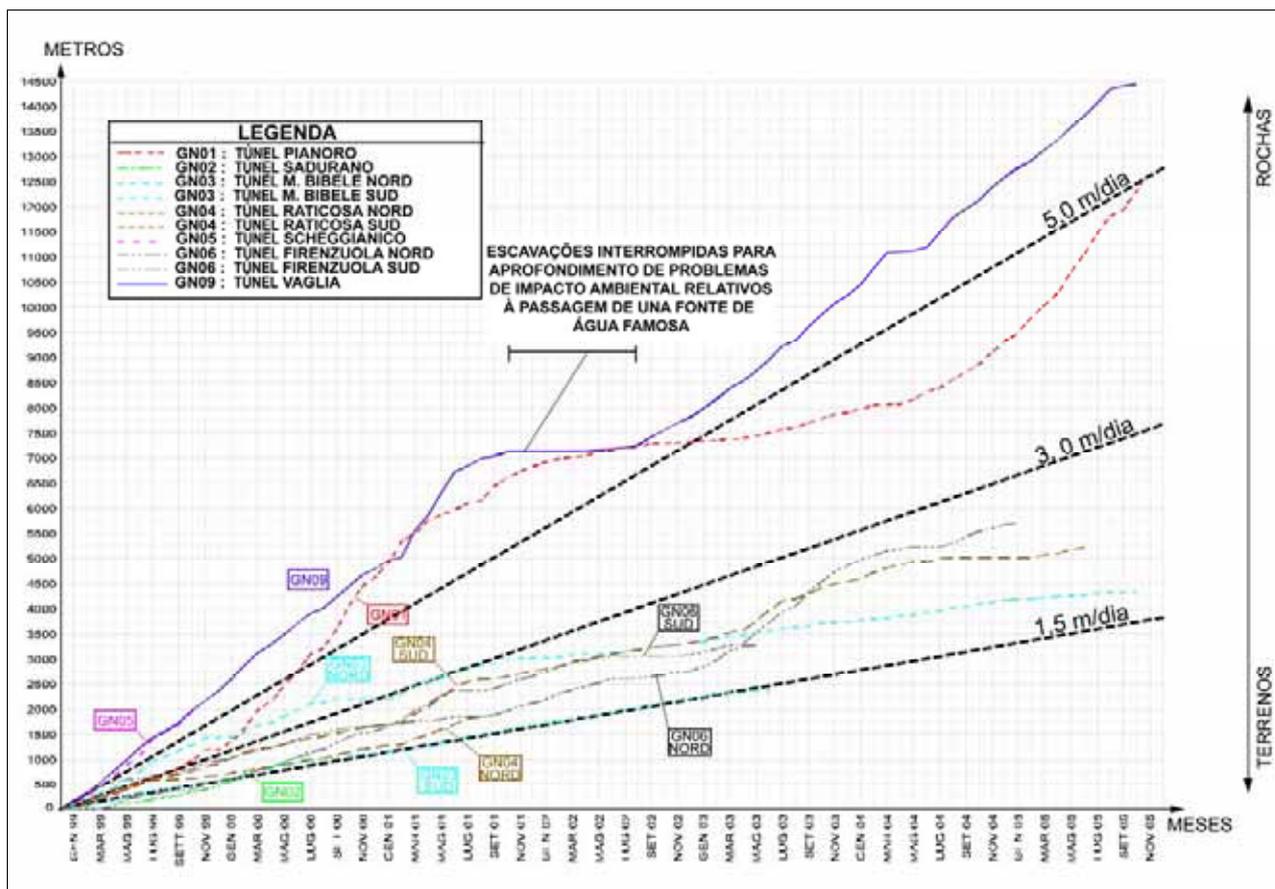


Figura 22. Os resultados obtidos nos diferentes condições de tensão-deformação encontradas.

### Construções de túneis

#### Especificações do contrato:

As obras do trecho ferroviário entre Bolonha e Florença, foram realizadas com um contrato rigorosamente fixo (valor de 4.209 bilhões de Euros) pela Fiat SpA, em qualidade de “GENERAL CONTRACTOR”, que em base ao projeto executivo preparado como descrito anteriormente, aceitou o encargo de todos os imprevistos, incluindo o geológico, delegando para o Consórcio Cavet todas as atividades (desapropriações, projeto, construção, validação, etc.).

#### Fase operativa

Imediatamente após a adjudicação do contrato, contemporaneamente às escavações (Julho de 1996) começou a projeção construtiva da obra.

Perante as informações adicionais disponíveis e as evidências encontradas in situ, a validade do projeto executivo resultou substancialmente confirmada e no projeto construtivo foram feitas apenas pequenas afinações:

- para tratar situações particularmente delicadas do ponto de vista da tensão-deformação, foi introduzida, na variabilidade das seções tipo B2, e C4, o uso de um enrijecimento de aço no invert de modo a obter uma ação eficaz de contenção dos fenômenos deformativos em tempos breve. A seção tipo B2, assim modificada, demonstrou-se muito versátil e adequada para muitas situações de núcleo-frente instável, limitando a utilização da seção tipo C em condições tenso-deformativas mais críticas.
- a eficácia da consolidação do núcleo-frente mediante elementos estruturais em “fiberglass” foi incrementada consideravelmente introduzindo, através de injeções no agulhamento, o uso de misturas cimentícias expandidas;
- como consequência da experiência positiva adquirida durante a construção de alguns túneis da linha Roma-Nápoles da mesma linha férrea (Lunardi e outros, 1997), foi concebida a seção tipo B2pr para a escavação convencional dos túneis “Sadurano”, “Borgo Rinzelli” e “Morticine”, originalmente previsto em “cut and cover”;
- finalmente, foram substituídas as seções B3 e C3, que utilizavam o pré-corte mecânico com a secção C2 (consolidação do núcleo-frente e do seu contorno com elementos estruturais em “fiberglass”) mais adequada aos terrenos encontrados..

Em fim, no projeto construtivo foram definidos os seguintes percentuais de aplicação das seções tipo:

- seções tipo A: 20,5%; seções tipo B: 57,5%; seções tipo C: 22,1%.

Foram realizados e revestidos cerca de 70,6 quilômetros de túneis. A produção média mensal foi da ordem de 1000 m de túnel acabado com um pico de 2.000 m, obtido em março 2001 trabalhando em 30 frentes contemporaneamente..

<sup>1</sup>Estudo da geoengenharia Lunardi, Milan (Itália)

e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)

Os gráficos de produção mostrados na fig. 22 demonstram a linearidade entre as elevadas produções obtidas em relação aos terrenos atravessados. Da mesma forma no túnel “Raticosa”, escavado em condições tenso-deformativas muito difíceis no “Complexo Chaotic” constituído pelas temidas argilas escamosas, as produções nunca foram inferiores a 1,5 m / dia. A Tabela I compara, para algumas seções tipo, os avanços diários previstos no projeto executivo e os valores efetivamente realizados.

Tabela I

Seções tipo	Avanços previstos [m/dia de túnel terminado]	Avanços realizados [m/dia de túnel terminado]
A	5,40	5 - 6
B0	4,30	5 - 5,5
B2	2,25	2,1 - 2,2
C1	1,40	1,4
C2	1,25	0,85
C4V	1,25	1,63

A Tabela II, por sua vez, compara as diferenças na distribuição das seções tipo entre o projeto executivo e o "as built", mostrando uma redução significativa de aplicação das seções tipo mais custosas em favor de outras mais econômicas. Este resultado é em grande parte devido à excepcional eficiência demonstrada pelas intervenções de pré-contenção da cavidade mesmo em condições de alta cobertura. Foi a primeira vez que foram aplicadas com cobertura maiores de 500 m. O avanço após enrijecimento do núcleo-frente, considerado às vezes contraprodutivo em coberturas elevadas, se utilizados corretamente, asseguram a continuidade da ação de montante à jusante da frente de escavação. A utilização de cambotas de reforço no invert, demonstrou-se muito eficaz em tais situações, limitando a utilização de seções mais “robustas” apenas nas condições mais críticas. Outra razão que conduziu a uma maior utilização da seção tipo A do que o esperado no projeto executivo é que diferiam das seções tipo B0 apenas na espessura do revestimento definitivo e a posição de execução do invert, um pouco mais distante da frente de escavação. Consequentemente, a seção tipo A foi usada no lugar das seções tipo B0 ou B0V em muitos trechos do túnel “Vaglia”, onde a presença do túnel de serviço adjacente, já construído, facilitou muito do ponto de vista geológico-geomecânico reduzindo o risco inerente ao uso de uma seção mais “leve”. As diferenças encontradas entre o projeto executivo e o quanto efetivamente foi realizado, não resultaram significativas nem em relação ao custo global da obra, que foi ligeiramente inferior (% ~ -5) ao previsto pelo projeto executivo, nem em relação ao tempo de construção. A empresa construtora beneficiou-se parcialmente da redução dos custos, pois correu maiores riscos aceitando um contrato rigorosamente a preço fixo. As administrações por sua vez, se beneficiaram da redução do tempo de construção, e os cidadãos ganharam uma nova infra-estrutura sem atrasos inaceitáveis.

*Fase de verificação*

A singularidade e a importância do projeto exigiu a implementação de um programa de monitoramento detalhado seja durante a construção que em fase de exercício.

Durante a construção foram observados:

- as frentes de escavação de túneis através de precisas medições geomecânicas conduzidas de acordo com os padrões do ISRM. Estas medições são muito úteis pois obtemos as primeiras informações sobre as características do maciço para comparar com as previstas no projeto;
- o comportamento deformativo do núcleo-frente, através da medidas de extrusão superficiais e profundas. A execução sistemática de tais medidas é crucial, principalmente quando as condições tenso-deformativas são difíceis porque fornecem indicações precisas e muito confiáveis sobre a evolução de fenômenos deformativos, auxiliando na escolha e na instalação com determinada tempestividade e multiplicada eficiência de todas as medidas preventivas eventualmente necessárias;
- o comportamento deformativo da cavidade através de medições sistemáticas de convergência;
- o comportamento das tensões do conjunto maciço-revestimento, através de células de pressão colocadas no contato terreno-revestimento e no interior do revestimento, de primeira fase ou definitivo.

Tabela II

TREM DE ALTA VELOCIDADE/CAPACIDADE - Linha Milano - Napoli - DISTRIBUIÇÃO DE SEÇÕES TIPO																													
TÚNEL	PROJETO EXECUTIVO															AS BUILT													
	Comp. [m]	DISTRIBUIÇÃO DE SEÇÕES TIPO [m]														Comp. [m]	Comp. escavado		DISTRIBUIÇÃO DE SEÇÕES TIPO [m]										
		A	B0	B0V	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C4V	C5	[%]		[m]	A	B0	B0V	B2	B2pr	B2V	C1	C2	C4	C4V	C6	
Pianoro	10293,4		951,8			3886,4	3036		62,0	948,8	1083	310		15,5	10710	100,0	10710,0		8167,0		682,5		63,0	3,5			1794,3		
Sadurano	3778,0	64,0	2580,8			875,0			68,0	190,3					3767,0	100,0	3767,0		2213,1	1408,0		85	53			8			
M. Bibelet	9118,5	978,2	1094,6		4529,1	1212,2			76,0	1112,8			115,6		9101,0	100,0	9101,1		2935,5	2015,7		3965,8		97,9	41	45			
Raticosa	10381,0	3043,0			972,2	758,4			40,0	786,7			4465,1		10367,0	100,0	10367,2		3680,0	786,0		857		25	85		1468	673,4	2792,6
Scheggiano	3530,6	2089,9			1404,7					36,0					3535,0	100,0	3535,0		3517,0	18,0									
Firenzuola	14311,5	3528,7			5950,4	716	412,2		227,5	511,9	2226,8	738,1			15211,0	100,0	15211,0		6833,1	3556,3		3081,8		263,5	577,1	9		125,83	43,46
B. Rinzell	455,0									160			295		528,5	100,0	528,5					303,5				225,1			
Morticine	273,7									80	193,7				565,5	100,0	565,5					537,0				28,5			
Vaglia	16757,0	2017,2	3104,3	1129,8	5629,0				1151,2	692	708,5				16757,0	100,0	16757,7		5287,60	9299,50	96,60	1547,0		296,70	128,25	101,4			
COMP. TOTAL [m]	68898,6	11721,0	7731,5	1129,8	18485,2	7447,9	3448,2	1151,2	1405,4	4488,6	3604,8	5628,8	2325,2	331,2	70542,3	100,0	70542,4		24466,2	25250,5	96,6	10219,1	893,5	746,1	834,8	417,0	1468,0	2593,5	2836,1
DISTRIBUIÇÃO SEÇÕES TIPO [%]		A	B0	B0V	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	C4V	C5					A	B0	B0V	B2	B2pr	B2V	C1	C2	C4	C4V	C6
		17,0	11,2	1,6	26,8	10,8	5,0	1,7	2,0	6,5	5,2	8,2	3,4	0,5					34,7	35,7	0,1	14,5	1,3	1,1	1,2	0,6	2,1	3,7	4,0

<sup>1</sup>Estudo da geoenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)



Figura 23. Túnel “Monte Bibele” - O núcleo-frente reforçado com agulhamento em “fiberglass” (terreno: flysch di Monghidoro).



Figura 24. Túnel “Firenzuola” - O núcleo-frente consolidado com micro-jet-grouting armado (terreno: areias argilosas com intercalações de cascalhos).

Durante a construção os resultados do monitoramento deixaram ao projetista e à direção das obras a possibilidade de prosseguir com a seção prevista ou alterá-la se necessário, de acordo com os critérios pré-indicados no projeto, aplicando a variabilidade já especificada no mesmo. Com esta impostação, as aleatoriedades relativas às obras subterrâneas foram controladas satisfatoriamente, mesmo com um contrato como esse entre TAV e Cavet, rigorosamente de preço fixo.

## CONCLUSÕES

A experiência adquirida com a realização, respeitando consideravelmente os prazos e os custos previstos e com um baixíssimo percentual de acidentes na frente de escavação, de uma obra de extraordinária extensão, heterogeneidade e dificuldade devido às situações encontradas no atravessamento dos Apeninos com a nova linha férrea de alta velocidade/capacidade entre Bolonha e Florença, demonstra que o método ADECO-RS é realmente capaz de enfrentar com sucesso qualquer tipo de terreno e condição de tensão-deformação assegurando o respeito dos prazos e dos custos de construção. As amplas áreas disponíveis na frente de escavação graças ao avanço à plena seção, permitem a utilização de máquinas potentes e portanto elevada produção industrial em relação às condições geológicas e de tensão-deformação encontradas. O ambiente de trabalho na frente é agradável e o número reduzido de mineiros asseguram níveis muito elevados de segurança jamais fornecidos por outros sistemas.

O aparente custo superior de um túnel construído com a ADECO-RS relativo a um similar construído com o NATM foi superado pelo altíssimo padrão de segurança garantido na frente de escavação (respeito pela vida humana), sem considerar a substancial economia, conseqüência da acentuada industrialização (respeito dos prazos e custos de construção).

## REFERÊNCIAS

- Rabcewicz L. (1964). The New Austrian Tunnelling Method. Part one, Water Power, November 1964, 453-457, Parte 2, Water Power, Dezembro 1964, 511-515
- Rabcewicz L. (1965). The New Austrian Tunnelling Method. Parte 3, Water Power, Janeiro 1965, 19-24.
- Lunardi P., Bindi R., and others (1993). Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method. VI European Forum of Engineering Economics, Bocconi University, Milão, 13-14 Maio 1993
- Kovári K., “On the Existence of NATM, Erroneous Concepts behind NATM”, Tunnel, No. 1, 1994 (Inglês e Alemão), ou Gallerie e Grandi Opere Sotteranee, No. 44, Dezembro 1994 (Italiano e Inglês).
- Lunardi P. e outros (1997) - Una soluzione innovativa per la realizzazione di gallerie naturali senza copertura. Quarry and Construction, Maio 1997.
- Martel J., Roujon M., Michel D. (1999). TGV Méditerranée – Tunnel Tartaiguille : méthode pleine section. Proceedings of the International Conference on “Underground works: ambitions and realities”, Paris, 25-28 Outubro 1999
- Lunardi P. (2000). Design & constructing tunnels – ADECO-RS approach. Tunnels & Tunnelling International, Especial Suplemento, Maio 2000
- Lunardi P. (2001). The ADECO-RS approach in the design and construction of the underground works of Rome to Naples High Speed Railway Line: a comparison between final design specifications, construction design and “as built”. AITES-ITA World Tunnel Congress su “Progress in tunnelling after 2000”, Milão, 10-13 Junho, 2001, Vol. 3, 329-340.
- Lunardi P. 2008. Design and construction of tunnels – Analysis of controlled deformation in rocks and soils. SPRINGER, Berlim Heidelberg. Disponível também em Italiano (Ed. HOEPLI) e Chinês (Ed. CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE)

<sup>1</sup>Estudo da geoengenharia Lunardi, Milan (Itália)  
e-mail: [pietro.lunardi@gmail.com](mailto:pietro.lunardi@gmail.com)