

APRENDIZADO EM GEOLOGIA DE ENGENHARIA – CASO DA REESCAVAÇÃO DO ANTIGO TÚNEL DE DESVIO DA UHE EUCLIDES DA CUNHA, SP

LEARNING IN ENGINEERING GEOLOGY – THE CASE OF
THE RE-EXCAVATION OF THE OLD BYPASS TUNNEL FROM THE
EUCLIDES DA CUNHA HYDROELÉTRIC POWER PLANT (HPP)

ALBERTO COPPEDÊ JUNIOR

Consultor, G&MA Geologia e Meio Ambiente Consultoria e Assessoria Ltda.

E-mail: coppede@gmaconsult.eng.br

RESUMO ABSTRACT

A UHE Euclides da Cunha, construída no final dos anos 1950 e reconstruída após acidente em 1977, localiza-se no alto Rio Pardo, em São José do Rio Pardo, SP. Em janeiro de 1977 houve ruptura da barragem de terra por galgamento, depois de chuvas intensas em ano excepcionalmente chuvoso. Para o projeto de reconstrução da usina, novos estudos hidrológicos recomendaram a implantação de vertedouro suplementar na ombreira esquerda, tipo tulipa, aproveitando para descarga o antigo túnel de desvio, com as adequações hidráulicas necessárias. Escavado e revestido à luz da tecnologia existente nos anos de 1950, o túnel encontrava-se bem preservado, mas a necessidade de reescavação tornou-se um desafio inusitado, por não haver informações disponíveis sobre a antiga construção (“as built”) e pelas dificuldades inerentes a critérios, métodos e técnicas de investigações e de engenharia de projeto disponíveis na época da reconstrução. Como consequência, conclui-se que dúvidas e incertezas sobre projeto e construção do antigo túnel só poderiam ser entendidas *a posteriori*, no decorrer do acompanhamento técnico das obras (“ATO”), mesmo contando com as informações de novas campanhas de investigações realizadas, tanto para o projeto básico de reescavação do túnel, como após a ocorrência de uma ruptura de abóbada com formação de “capela”, que atingiu a superfície da ombreira. A ruptura do túnel agravou ainda mais as apreensões existentes à época das obras de

The Euclides da Cunha HPP, built in the late 1950's and rebuilt after the accident of 1977, is located in the upper Rio Pardo, in São José do Rio Pardo, São Paulo. In January 1977 there was a breakage of earth dam by overtopping, after heavy rains in an exceptionally rainy year. For the HPP rebuilding design, new hydrologic studies have recommended the deployment of an additional spillway in the left shoulder, tulip type, taking advantage of the old bypass tunnel for discharging, with the hydraulic adjustments necessary. Excavated and lined in light of existing technology in the 1950's, the tunnel was well preserved, but the need of re-excavation became an unusual challenge, because there wasn't available information about the old building (as built) and by the inherent difficulties relating to criteria, methods and techniques of investigations and available project engineering at the time of the reconstruction. As a consequence, it was concluded that doubts and uncertainties about design and construction of the old tunnel could only be understood “a posteriori”, during the technical followup (TF), even relying on the information from new campaigns of investigations carried out, both for the basic design of tunnel re-excavation, as for the occurrence of a great breakage from the roof arch with the formation of a great overbreak (“chapel”), which reached the shoulder surface. The tunnel breakage further aggravated the existing concerns at the time

reescavação, mas veio a propiciar interessante aprendizado, ainda oportuno à análises e reflexões sobre melhorias na interação contínua entre investigações, projeto, ATO e adequações de projetos no transcorrer de construção de obras subterrâneas implantadas com o *NATM* (*New Austrian Tunnelling Method*), ou Novo Método Austríaco de Abertura de Túneis.

Palavras-chave: Reescavação de antigo túnel, *NATM*, aprendizado em geologia de engenharia, *BIM* Geotécnico

1 CONTEXTO

1.1 Geologia, Relevo e Lay Out do Aproveitamento

Sob o ponto de vista regional, o trecho do alto rio Pardo, entre os municípios paulistas de Caconde e Mococa, onde está inserida a UHE de Euclides da Cunha, município de São Jose do Rio Pardo, assenta-se em domínios geológicos do embasamento cristalino Arqueano do Complexo Varginha, Maciço de Guaxupé (2.500 a 4.500 milhões de anos), localmente representado por litologias granito-gnáissicas bandas na direção NNE, com mergulho de 20-30°SE. A bibliografia referente à geologia, evolução tectônica e geomorfológica que se manifestou ao longo do tempo geológico nessa região, entre as quais se destaca a extensa compilação apresentada pelo IPT (1992), mostra que o arcabouço atual do relevo é sustentado por maciços granito-ganáissicos, expondo proeminentes estruturas formadas até o final do Mesozóico (Cretáceo, há 70 milhões de anos), relacionadas à Falha de Guaxupé, a qual encontra-se associado um sistema de intenso fraturamento, onde as estruturas principais (maiores alinhamentos) estão orientadas na direção NNE e, secundariamente, na direção NNW (menores alinhamentos). O curso rio Pardo no local da UHE de Euclides da Cunha encontra-se encaixado nesse alinhamento de orientação NNE, concordante com o falhamento e foliação do granito gnáisse do Maciço de Guaxupé.

of the re-excavation works, but it provided interesting lessons, yet timely for analyses and reflections on improvements in the continuous interaction between investigations, design, TF, and design adjustments during the underground constructions deployed by the *NATM* (*New Austrian Tunnelling Method*).

Keywords: re-excavation of previous tunnel; *NATM*; learning in engineering geology, geotechnical *BIM*.

Ainda segundo IPT (1992), esse sistema foi posteriormente reativado por movimentações neotectônicas distensivas, iniciadas no final do Cenozóico (ainda no Terciário, há 20 milhões de anos) e que deve se estender até o presente, resultando em deslocamentos de blocos, ora em sentidos subhorizontais, ora em subverticais que, submetidos à dinâmica de processos superficiais (geomorfológicos), propiciaram a atual esculturação do relevo e o desenho de uma rede de drenagem com alto gradiente hidráulico, ao longo de vales fechados com seções simétricas e assimétricas (Coppedê 1989 e 1990).

É nesse ambiente geológico que está inserida a UHE de Euclides da Cunha (figura 1). O sítio compreende um trecho de rio com alto gradiente hidráulico, vale encaixado e ombreiras íngremes, o que condicionou a escolha de um lay out para aproveitamento a fio d'água de uma queda útil de 92m e casa de força subterrânea. Ou seja, pequeno reservatório de 1,0 km², formado por uma barragem de terra de 312m de comprimento e 60m de altura. Na ombreira direita foi implantado o sistema em torre para adução à uma casa de força subterrânea, com capacidade instalada de 108 MW, tendo sua descarga em túnel com aproximadamente 2 km de extensão. Na ombreira esquerda foram implantados: (a) o sistema de desvio em túnel, tamponado por stop logs; e (b) o sistema vertente de superfície, para operar com comportas setor, descarga em calha curva e dissipação em salto de esqui.

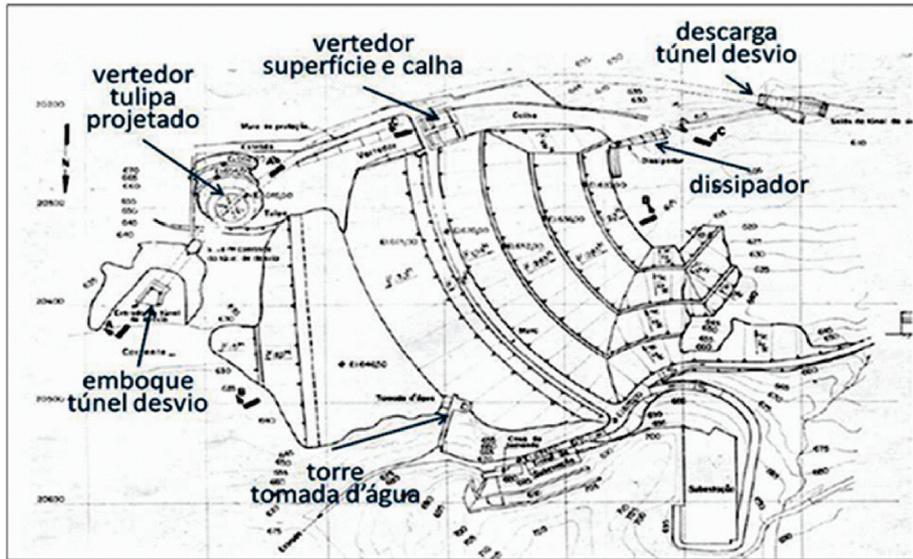


Figura.1 - Lay out de construção da UHE Euclides da Cunha no final da década de 1950, em São José do Rio Pardo, SP (Cardia et al. 2007)

1.2 Ruptura da Barragem e Projeto de Reconstrução

A ruptura da barragem de terra ocorreu em janeiro de 1977 (figura 2). Como diagnosticada *a posteriori*, a ruptura se deu em decorrência de uma sobreposição de fatores adversos, ocorridos durante episódio de chuvas intensas em período excepcionalmente curto (tromba d'água), tais como: intensidade de chuvas imprevisíveis à luz dos estudos hidrológicos à época de projeto; baixa capacidade de amortecimento de cheias excepcionais pelo pequeno reservatório; insuficiência de capacidade vertente para vazões afluentes

excepcionalmente altas; e possível falha na operação de comportas no momento de vazões excepcionais do rio.

A reconstrução da Usina foi completada em meados de 1981 (figura 3), contemplando, além da recomposição da barragem de terra e demais instalações, a necessidade de implantação de um vertedor suplementar na ombreira esquerda, a montante do vertedor de superfície existente na mesma ombreira, com a construção de um vertedor tipo tulipa aproveitando o antigo túnel de desvio do rio, também localizado na ombreira esquerda, para que esse túnel operasse a descarga da tulipa.

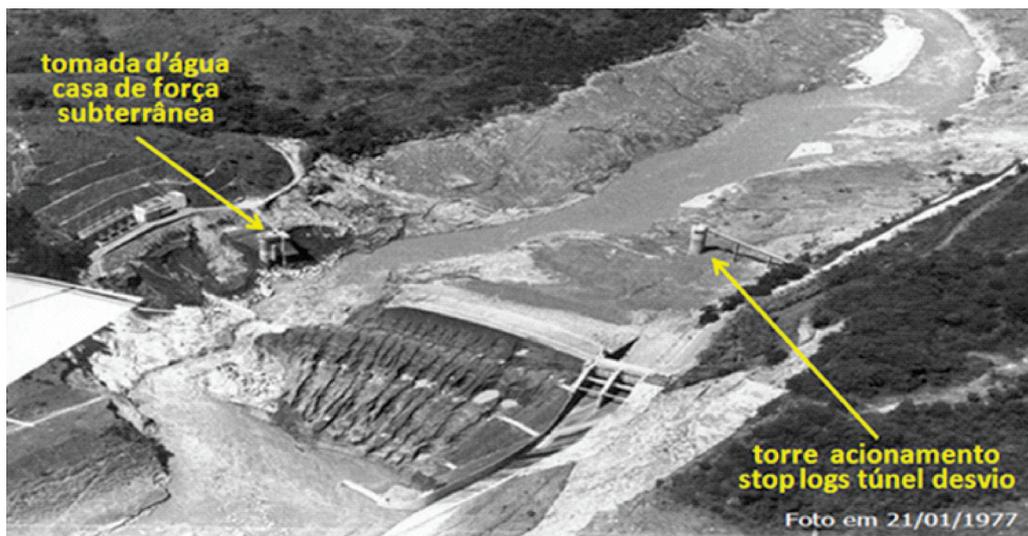


Figura 2 - UHE Euclides da Cunha, momento pós ruptura em janeiro de 1977 (Carvalho 2007).

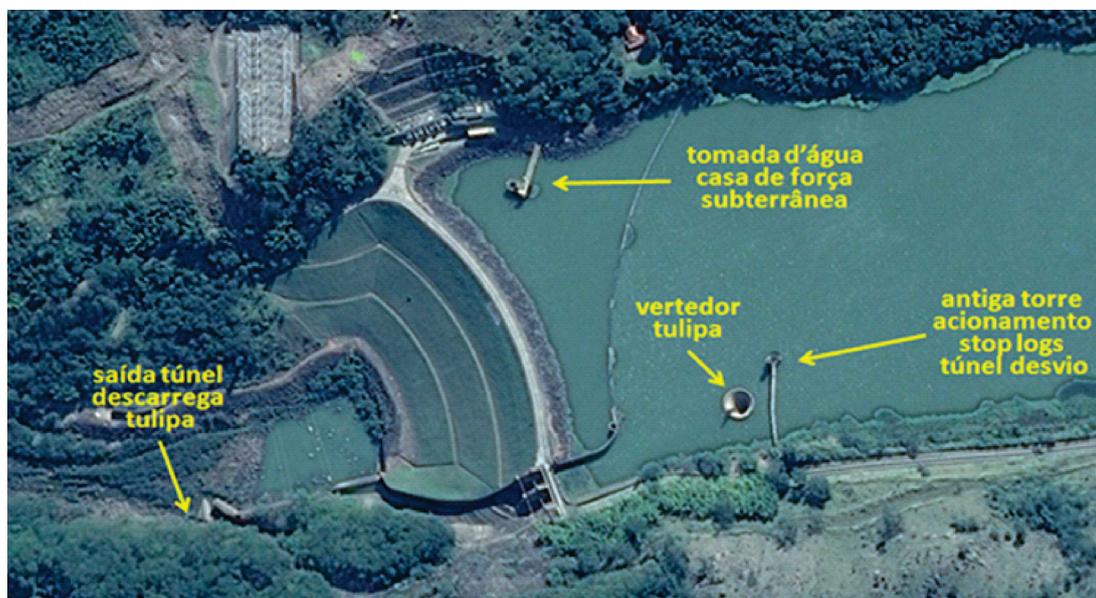


Figura 3 - UHE Euclides da Cunha, pós reconstrução em 1981 (Imagem Google 2015)

A reescavação do antigo túnel foi projetada para ser executada pelo método *NATM* (Rabcewicz 1964 e 1965), devido aos requisitos de alterações da geometria original de seções e perfil do antigo túnel, visando adequá-los aos requisitos hidráulicos funcionais para descarga da tulipa, representando hoje um caso bem sucedido de aproveitamento de antiga obra de túnel de desvio para incorporação a um novo sistema vertente, agregando-se o incremento desejado de segurança operacional da antiga Usina.

Entretanto, na época de elaboração do projeto de projeto básico da reescavação havia incertezas para aplicação das variações construtivas inerentes ao *NATM*, geradas pela necessidade de: (1) compatibilizações do método construtivo às peculiaridades do projeto concomitantemente à reescavação de um antigo túnel; do qual não se dispunha do histórico de construção; e (2) adequação de termos contratuais, na época não flexíveis, às compatibilizações necessárias de projeto e construção com a aplicação desse método, principalmente pelo citado fato de não se dispor de informações da época de construção (*“as built”*) e pela necessidade de rígidas condições de segurança de construção e prazo para reinauguração da Usina. Assim, cabe ressaltar que pelo menos dois dos princípios básicos que norteiam a aplicação do *NATM* poderiam impactar negativamente a reescavação do túnel no tocante a prazos e custos:

- 1º “Necessidade de controle do relaxamento das tensões e deformações no entorno e concomitante às escavações”, de maneira a permitir que o próprio maciço seja autossustentável ou contribua para reduzir custosas intervenções de sustentação e revestimentos definitivos, intervenções essas somente possíveis de serem projetadas e dimensionadas durante o avanço das escavações, em função da cuidadosa identificação das características a serem encontradas no concreto e maciço remanescentes das antigas obras de construção do túnel;
- 2º “Adoção de contrato flexível com a empresa executora (Empreiteira)”, cujos termos contemplem a possibilidade de se poder praticar alterações de métodos construtivos, concomitantemente ao andamento dos avanços.

O *NATM* considera a necessidade de observações e monitoramento das características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas exibidas pelo maciço no decorrer das escavações, a partir das quais se pratica as adequações de projeto e de métodos de escavação e sustentação do maciço, ou seja, *“faz-se”* as adequações necessárias de projeto e construção durante o andamento da construção. Isso só é possível com acompanhamento da escavação por profissionais *“tuneleiros”* experientes, tanto nas atividades de ATO, como da Engenharia de Projeto e se o sistema contratual possibilitar

tais adequações. Caso os termos contratuais não sejam flexíveis à aplicação do *NATM* ou, como mais recentemente praticado no âmbito de contratos em regime *turn key*, com preço e prazo fechados para aplicação desse método construtivo, as dificuldades com adequações necessárias certamente se tornarão obstáculos desgastantes ao relacionamento contratual.

Melhor contextualizando, as incertezas para aplicação do *NATM* na reescavação do antigo túnel acentuavam-se, ao se considerar as peculiaridades do local da obra, pois ambas as estruturas dos sistemas vertentes, de superfície (vertedor e calha) e de túnel de descarga da tulipa, estariam na mesma ombreira, aproximadamente superpostas e à pequena distância vertical uma da outra (30 a 35m). Assim, admitia-se que qualquer deformação excessiva no maciço da ombreira esquerda, decorrente das obras de reescavação do túnel, poderia afetar a estrutura da calha do vertedor que estaria funcionando como desvio de 2ª etapa da reconstrução da barragem e, com isso, poderia gerar situação de instabilidade à segurança física das antigas estruturas já implantadas na ombreira esquerda, quais sejam de montante a jusante: (1) corpo da tulipa em fase final de construção; (2) ombreira da barragem de terra; e (3) sistema vertedor de superfície, com suas estruturas de comportas, calha vertente e dissipador.

1.3 Objetivos com o Presente Relato

Tem-se por objetivo apresentar uma breve contribuição à participação da Geologia de Engenharia na interface com Engenharia de Projeto de obras subterrâneas com emprego do *NATM*, tanto nas fases de investigações e elaboração de projetos, como na de adequação destes com o Acompanhamento Técnico de Obras (ATO).

Para tanto, procurou-se resgatar o aprendizado propiciado por ocasião da reconstrução da UHE de Euclides da Cunha, particularmente referente às obras de reescavação do antigo túnel de desvio, no tocante à: (1) investigações geológicas e geotécnicas realizadas; (2) elaboração da engenharia de projeto de reescavação; (3) procedimentos do ATO das obras de reescavação; (4) análise de causas da ruptura ocorrida na reescavação de abóbada do trecho crítico desse túnel; e (5)

experiências vivenciadas com implicações dessa ruptura nas alterações de projeto e retomada de reescavações, considerando que essa ruptura provocou um abatimento da superfície da ombreira, próxima à calha do vertedor de superfície e que no momento da ruptura operava como desvio de 2ª etapa de reconstrução da barragem, o que gerou apreensões em todas as equipes direta e indiretamente envolvidas na reconstrução da Usina.

2 QUESTÕES E ENTENDIMENTOS GERADOS PELAS INVESTIGAÇÕES

Conforme informado, na época do acidente da UHE, parte da documentação fora perdida devido à inundação de sala de arquivos que ficava na casa de força subterrânea. Possivelmente, os relatórios técnicos de construção estavam entre os materiais perdidos. Portanto, não se teve acesso às informações de *as built* da antiga obra do túnel, notadamente sobre aspectos geológicos de interesse, sondagens realizadas, diários de obras, relatos de ocorrências etc.

Para a etapa de projeto básico da reescavação, as informações disponibilizadas foram coletadas de mapeamento de afloramentos existentes na área exposta pela ruptura da barragem, no alto das ombreiras esquerda e direita e de sondagens rotativas para o projeto básico, que possibilitaram as constatações a seguir apresentadas.

Dos mapeamentos, foi possível identificar feições litoestruturais da zona de fraturamento associada à Falha de Guaxupé (IPT 1978 e 1992), com marcante presença no sítio da barragem, quais sejam: (1) fraturamento NNE, com fraturas subparalelas ao eixo do túnel; (2) fraturamento NNW, constituindo, com fraturas subperpendiculares ao eixo do túnel; e (3) fraturamento ao longo do fino bandamento do maciço granito gnáissico, predominantemente onde se encontrava oxidado, ou seja, nas porções intermediárias constituídas por rocha medianamente alterada. Para a escala do projeto básico foi identificado que as fraturas: (1) NNE ocorreriam subparalelas ao eixo do túnel, probabilisticamente com menor frequência; (2) as NNW ocorreriam subperpendicularmente ao eixo, constituindo “feixes de fraturas”, espaçados a cada 10m, sendo que cada feixe tinha espessura de 3 a 5m, contendo 5 ou 7 fraturas

subparalelas entre si; enquanto que (3) as NNE, concordantes com o bandamento, ocorreriam associadas a graus mais evoluídos de alteração do maciço granito gnáissico, notadamente nos maciços constituídos pela zona de transição entre rochas alteradas e sãs.

Na prática, tinha-se que a interseção desses três sistemas de fraturamentos geraria uma alternância a cada 10m entre zonas mais e menos fraturadas, com possíveis implicações na estabilidade de teto durante as escavações, ou seja: onde a rocha fosse sã (granito gnaissic são) poderia não ocorrer comportamento desfavorável, enquanto que onde a rocha fosse afetada por graus mais evoluídos de alteração (zona de transição, com rochas medianamente alteradas), o comportamento do teto poderia se manifestar como desfavorável à estabilidade de teto, principalmente com desarticulação de blocos.

Diante das características geométricas das seções do projeto de reescavação pelo NATM, da geologia da ombreira esquerda, que nessa época encontrava-se drenada em decorrência de drenagem induzida pelas obras de implantação do antigo túnel, convencionou-se para elaboração do projeto básico compartimentar o maciço em 3 classes (Tognon et al. 1981), quais sejam:

- **maciço classe I:** constituído de rocha sã e pouco fraturada, com comportamento esperado de boa estabilidade, praticamente não requerendo reforço para autossustentação, ou seja, esperava-se comportamento favorável na reescavação, diante de incertezas da falta de informações de *as built*;
- **maciço classe II** – constituído de rocha medianamente alterada a sã, alternando medianamente a muito fraturada, cujas fraturas apresentavam paredes pouco a muito oxidadas, sujeito à desarticulações por queda de blocos, requerendo avanços cuidadosos e reforço de sustentação, através de concreto projetado e tirantes, ou seja, esperava-se comportamento pouco favorável por queda de blocos, também diante de incertezas por falta de informações de *as built*; e

- **maciço classe III** – constituído de rocha muito alterada e comportamento esperado como muito instável a qualquer método de escavação, requerendo avanços cuidadosos e reforço de sustentação através de concreto projetado e cambotas, ou seja, esperava-se comportamento de baixa estabilidade e preocupante, diante das incertezas de falta de informações de *as built*, por essas razões tido como um “trecho crítico”.

Com os resultados das sondagens realizadas para o projeto básico e a classificação estabelecida para o maciço, foram traçadas seções geológico geotécnicas, de onde foi constatado que, dos quase 500m de túnel, apenas um trecho de aproximadamente 30m apresentava-se como crítico à aplicação do NATM, devido à previsão de escavação pela abóbada, onde o maciço apresentava característica de baixa estabilidade, com passagem brusca de maciço de rochas duras (medianamente alterada a sã) para maciço muito alterado, ou seja, praticamente não havia maciço de transição nesse trecho crítico.

Para a etapa seguinte de detalhamento do projeto básico, apenas esse trecho de previsível comportamento desfavorável às escavações de teto passou a ser objeto de interesse à realização de algumas investigações complementares. Assim, foram executadas mais 3 sondagens inclinadas e perfurações rotoperçussivas exploratórias a partir da abóbada do túnel (hastes de 1,5m), com intuito de se obter mais informações associadas à constatação da existência de outras particularidades desse trecho na interface com o concreto da abóbada, como pequenos vazios, materiais de baixa recuperação, perdas d'água de sondagem etc.

Os resultados dessas investigações complementares confirmaram presença de rochas muito alteradas, pequenos vazios e espessuras variáveis do concreto da abóbada do túnel, às vezes com presença de madeiramento, com o que foram consolidadas as seções geológico geotécnicas ao longo e transversais ao eixo do túnel (figura 4).

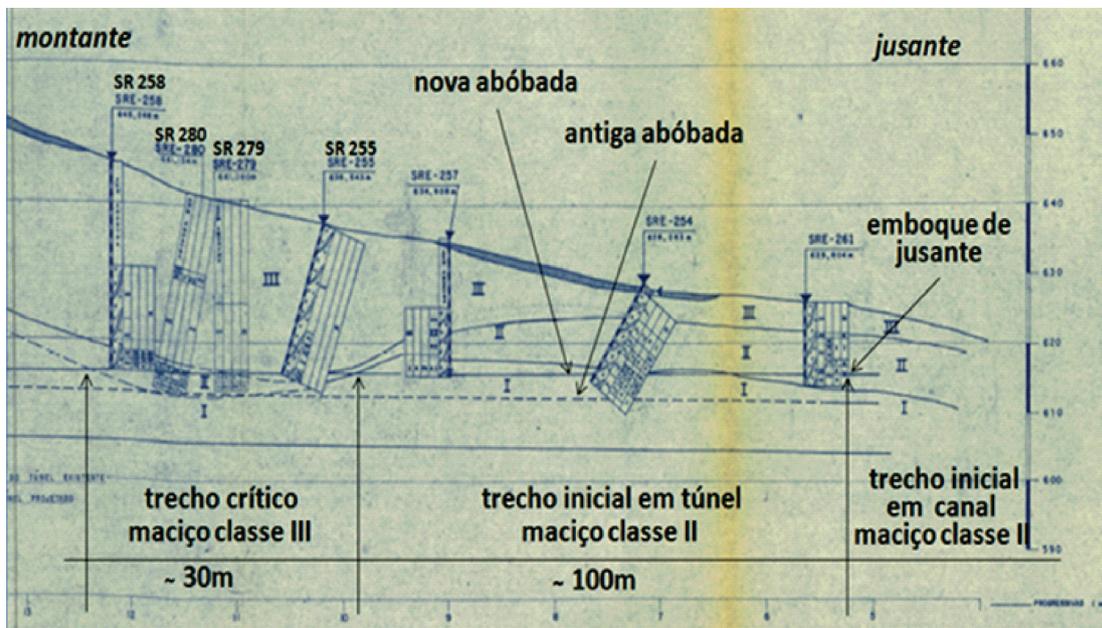


Figura 4 – Seção geológica geotécnica pelo eixo do túnel, correspondente ao trecho de jusante, com escavação pela abóbada, sendo que a reescavação seria iniciada de jusante a montante por trecho em canal, devido à baixa cobertura (inferior a 8m), até ser embocado seu trecho inicial em túnel no maciço classe II, passando a classe III onde ocorreria o maciço de baixa estabilidade – “trecho crítico” (IPT, 1980).

Assim, foram estes os resultados de investigações apresentados para a fase de detalhamento do projeto básico que, a princípio, sugeriam questões a serem observadas com o andamento dos serviços de ATO da reescavação, visando adequar o projeto ao entendimento dessas questões, conforme listadas no item 3.1 a seguir.

3 QUESTÕES E ENTENDIMENTOS GERADOS NO ATO

De uma forma geral, partiu-se da premissa que o desenvolvimento do ATO com a reescavação do antigo túnel propiciaria uma oportunidade inusitada de se observar e entender, a cada passo de avanço, como se comportaram os maciços de baixa qualidade geomecânica na época de abertura do antigo túnel. Vale lembrar que a obra foi construída no final da década de 1950, antes dos modernos conceitos do NATM terem sido aplicados no Brasil. Assim, com a observação dos procedimentos construtivos adotados e deformações ocorridas com a construção no final dos anos 1950,

tinha-se a expectativa que, a luz da experiência com abertura de túneis nos anos de 1970, seria possível adequar as especificações construtivas de projeto para aplicação do NATM, durante as constatações com o andamento das obras de reescavação do antigo túnel.

3.1 Trecho Inicial em Canal e Primeiros 100m Túnel em Maciço Classe II

As obras de reescavação foram iniciadas pelo emboque de jusante, com trecho em canal (figura 5), por tratar-se de trecho onde o projeto especificou reescavação pela abóbada, até que a frente de avanço atingisse altura mínima igual a 1,5 vezes o diâmetro do túnel original. Nesse ponto, o talude vertical da frente seria preparado para embocar o túnel (figuras 6 e 7). A partir desse emboque, a reescavação do trecho inicial em túnel deveria se prolongar pela abóbada pelos primeiros 100m que, conforme seção da figura 4, sendo que ambos os trechos atravessariam maciço classe II.



Figura 5 - Vista de jusante - escavações em canal, para embocar a reescavação. Observa-se a superfície do talude frontal, onde foi implantado o emboque no plano de uma fratura do sistema NNW, oblíquo ao eixo do túnel (arquivo pessoal).

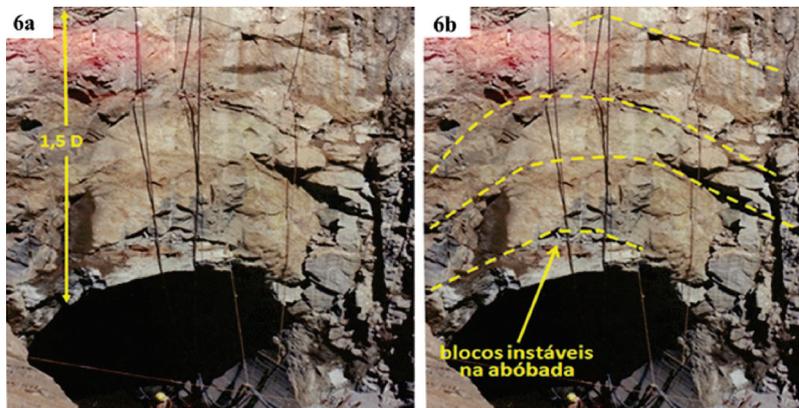


Figura 6 - Observa-se o sistema de fraturamento de alívio de tensões induzido pelas escavações do antigo túnel em maciço classe II, até aproximadamente um e meio diâmetro (1,5 D) acima do contorno de escavação do antigo túnel. Os blocos instáveis na abóbada eram condicionados pela interseção de fraturas dos sistemas NNE e NNW (respectivamente subparalelas e oblíquas ao eixo do túnel), com as do fino bandamento do granito gnaissé que nesse maciço classe II encontrava-se de levemente a muito oxidado (arquivo pessoal).



Figura 7 - Observa-se que a instabilidade do maciço classe II no contorno do 1º passo de avanço do emboque, antes (figuras 6a e 6b) e pós desmorte (esta foto), foi influenciada pela interseção dos sistemas de fraturamentos: (1) NNW; (2) bandamento oxidado do granito gnaissé; e (3) de alívio de tensão induzido pelas escavações do antigo túnel, que condicionaram desarticulação dos blocos sobre o concreto de abóbada (arquivo pessoal).

Em decorrência das observações de comportamento do maciço classe II foram aventadas as seguintes questões: (1^a) O fraturamento condicionou o comportamento do maciço diante das escavações na época do antigo túnel? (2^a) Que implicações resultaram dos procedimentos construtivos adotados na época? (3^a) Esses procedimentos favoreciam o relaxamento do maciço? (4^a) Que tipos de escoramentos foram usados? estes escoramentos devem ter sido efetivos no controle das deformações? e (5^a) Que adequações poderiam ser feitas nas especificações de projeto para aplicação do NATM no andamento dos primeiros 100m de obras em túnel?.

Como era de se esperar, as escavações no trecho em canal confirmaram que o fraturamento condicionou o comportamento do maciço classe II. Dos procedimentos construtivos adotados na década de 1950 resultaram trechos alternados com contorno de escavação irregular, indicando que houve tempo excessivo de exposição pós detonações, que deram origem a relaxamentos como os indicados na figura 7 e a conseqüente queda progressiva de blocos, como indicada nas figuras 6 e 7, que exibiam tamanhos variáveis e faces com oxidações, gerando os *overbreaks*.

Nesses locais era comum haver alteração da geometria da seção escavada, quase sempre sustentada pela aplicação de escoramentos de madeira, que estavam preservados no contato concreto/rocha. Por outro lado, cabe destacar que não foram encontradas evidências de aplicação de tirantes.

Também foi possível observar que o antigo método construtivo no maciço classe II possibilitou a propagação de deformações (fraturas de relaxamento e queda de blocos) pela região acima da abóbada, até cerca de um diâmetro do antigo túnel (1,5 D), como se pode perceber na figura 6.

Diante dessa observação, as especificações construtivas para os primeiros 100m em NATM em maciço classe II passaram por adequações, adotando-se pequenos passos de avanço, combinados com aplicação de concreto projetado e cambotas, visto que a alternativa de concreto projetado e aplicação de tirantes (inicialmente prevista para esse trecho) poderia potencializar riscos de queda de blocos. Assim, o andamento do trecho inicial da obra em túnel nos primeiros 100m em classe II se deu com as devidas adequações, até às

proximidades do trecho em maciço classe III (trecho crítico).

3.2 Trecho Crítico – 30m de Túnel em Maciço Classe III

Pelo que indicava a seção da figura 4, as reescavações de abóbada iriam passar por um curto e delgado trecho de maciço classe II e, em seguida, entrar no trecho crítico de classe III. Cabe ressaltar que as sondagens verticais exploratórias realizadas nesse trecho para o projeto básico, além de indicarem a presença dominante de rocha alterada (granito gnaise na forma de saprolito), haviam detectado, próximo ao concreto da abóbada do antigo túnel, passagens centimétricas a decimétricas de materiais friáveis, ora com baixa recuperação e descritos como solos, ora como materiais não recuperados, quase sempre com perda d'água de circulação das sondagens, indicativos da presença de pequenos vazios. Deve-se ressaltar que, por medida de segurança, as sondagens foram interrompidas quando atingiam o concreto de revestimento do túnel.

Tais trechos de materiais friáveis e de pequenos vazios detectados nas sondagens geraram dúvidas e para detalhamento do projeto básico foram realizadas mais três sondagens rotativas inclinadas, que repetiram amostragens semelhantes às anteriores, ou seja, deixaram ainda as mesmas dúvidas. Essas passagens, aliadas à classe de maciço III e ao fato desse trecho já ter passado por obras de escavação do antigo túnel, sugeriam que poderiam ser encontradas condições críticas de estabilidade nas reescavações. Entretanto, considerou-se não haver ainda dados factuais suficientes para se propor alteração ou adequação das especificações construtivas durante o andamento do projeto básico, via emprego de complementos construtivos de reforço de abóbada, recomendáveis na aplicação do NATM.

Assim, esperava-se que no início da escavação desse trecho crítico fosse possível realizar observações sobre as seguintes questões: (1^a) O alto grau de alteração e saturação da rocha alterada condicionaram o comportamento do maciço diante das escavações na época do antigo túnel? (2^a) Que procedimentos construtivos foram adotados na época? (3^a) Esses procedimentos teriam sido

adequados ou problemáticos? (4ª) Que tipo de escoramentos foram usados? (5ª) Que adequações poderiam ser feitas nas especificações de projeto para se atravessar esse trecho com aplicação do NATM?

As dificuldades encontradas na época de abertura do antigo túnel foram logo aparecendo, a partir dos primeiros metros de avanço das escavações, ainda no curto trecho de maciço de espessura delgada de classe II. Ou seja, foi encontrado um vazio contínuo sobre a abóbada do antigo túnel,

em forma de pequena galeria com aproximadamente 2,5m de comprimento por 1,0m de altura, condicionada por fraturamento, com forte escoramento de madeira ainda preservado, indicado na figura 8, sendo que esse espaço, denominado “Galeria”, dava acesso a um vazio cônico, com aproximadamente 6,0m de altura, denominado “Capela 1, também com estabilidade precária, que já se encontrava plenamente encaixada no maciço classe III, que no local encontrava-se não saturado.

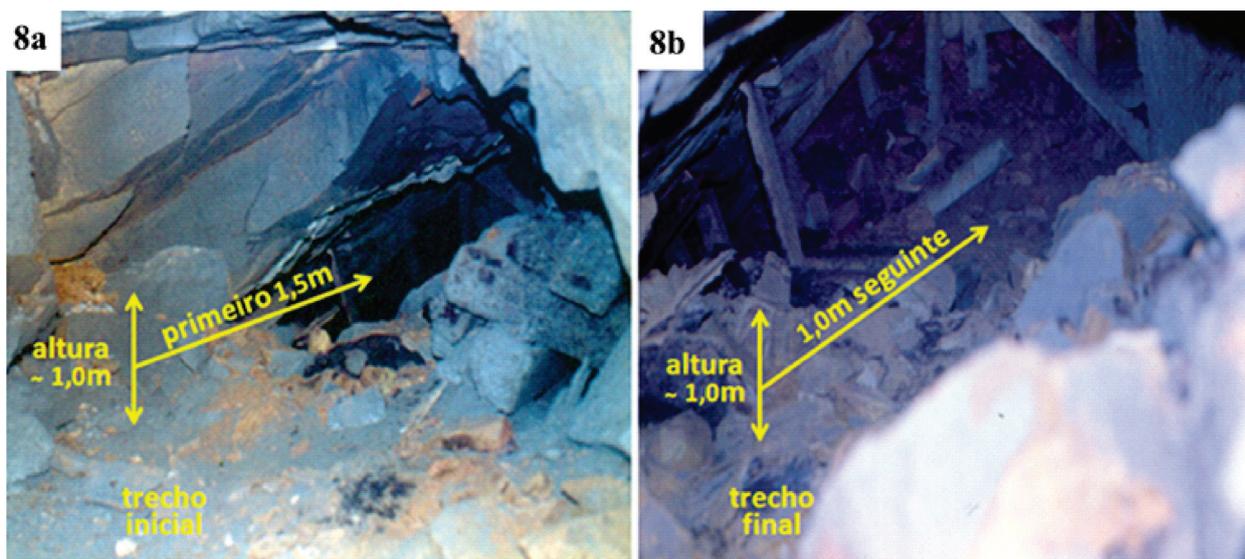


Figura 8 - Vistas de jusante, mostrando os 2,5m do caimento de teto em “Galeria” (1,0m de altura por 2,5m de extensão) encontrada na abóbada do antigo túnel, condicionada pela interseção dos três sistemas de fraturamento (NNE, NNW e bandamento) com as fraturas induzidas pelo relaxamento do maciço na época de construção do antigo túnel. Essa Galeria deu acesso à visualização da Capela 1 que já existia no maciço classe III (arquivo pessoal).

Essa manifestação de comportamento desfavorável de caimento de teto em “Galeria” e da Capela 1, ambas em maciço classe III, diante dos procedimentos construtivos adotados na época de construção do antigo túnel denota que esse maciço ficou submetido a drenagem rápida e a excessivo tempo de relaxamento de tensões, indicando que as características geotécnicas estavam associadas ao alto grau de alteração e saturação em que se encontrava originalmente o maciço classe III, o que condicionou esse comportamento desfavorável. As observações do madeiramento embutido no concreto de primeira fase da antiga obra indicaram que os suportes de madeira foram usados

de forma sistemática no trecho crítico. Apresentavam geometria similar às das atuais cambotas metálicas, estando solidarizadas ao maciço com pranchões e pontaletes, visíveis na figura 8.

Esses antigos procedimentos construtivos, apesar de terem possibilitado a abertura do túnel em maciço de baixa competência geomecânica, deixaram atrás de seus revestimentos sequelas de deformações excessivas e desarticulações do maciço, como a dos vazios com as dimensões em que foram encontrados no ATO (Galeria e Capela 1). É interessante destacar que as sondagens não detectaram nem mesmo indícios das grandes dimensões desses vazios.

O fato de se encontrar o vazio da Galeria no final do trecho em maciço classe II e da Capela 1 no maciço classe III -- gerou dúvidas e incertezas técnicas ainda maiores quanto a custos e cronograma. Ou seja, com essas primeiras constatações de comportamento do maciço classe III deu-se como certa a necessidade de adequações das especificações construtivas do *NATM* para esse trecho crítico.

Entretanto, verificou-se que essas adequações julgadas necessárias implicariam em alterações significativas de métodos construtivos, custos e prazos.

Diante dessas implicações, principalmente a de prazo, foram aventadas duas alternativas de adequações construtivas a selecionar, sendo que: a (1ª) propunha adotar-se solução estranha ao *NATM*, supondo-se ser possível atender ao limitante de prazo, mas com aplicabilidade construtiva duvidosa à luz do contexto até então encontrado no trecho crítico da obra; e a (2ª) propunha adotar-se a solução construtiva seguindo-se os princípios do *NATM*, que sinalizava com riscos construtivos menores, porém com riscos maiores de não cumprimento do cronograma inicial da obra.

A decisão tomada foi por se continuar a reescavação do túnel adotando-se as adequações referentes à 1ª alternativa. E assim, foi com dúvidas sobre a alternativa escolhida, posições pró e contra que projeto e obra prosseguiram.

4 APRENDIZADO COM AS INVESTIGAÇÕES E ATO

Cabe destacar que o presente relato de aprendizado está sendo elaborado à luz de conhecimentos atuais (ano 2015) no campo da Geologia de Engenharia (investigações e informatização no uso da informação) e da Engenharia de Projeto de aplicação do *NATM*, referindo-se a uma experiência vivenciada no período de 1978/1981, com a reescavação de um antigo túnel construído no final da década de 1950.

4.1 Aprendizado com as Investigações Realizadas para o Projeto Básico

Os serviços de investigações resumiram-se à realização de sondagens rotativas convencionais ao longo do eixo do antigo túnel de desvio no trecho a jusante da barragem, tendo em vista que nesse trecho o maciço rochoso alterado também aflora na ombreira esquerda e apenas nesse trecho haveria reescavação de abóbada, conforme necessidades hidráulicas consolidadas no projeto básico.

Essas sondagens tinham por objetivo, além da investigação das características geológicas geotécnicas do maciço acima da abóbada, tentar detectar feições resultantes de deformações excessivas com a antiga escavação do túnel. Sob o ponto de vista da identificação das características do maciço de cobertura do túnel, as sondagens cumpriram com o objetivo a que se destinavam.

Entretanto, apesar das sondagens terem sido realizadas conforme melhores práticas (ABGE, 2013) falharam na detecção de feições resultantes das citadas deformações excessivas. Ou seja, não detectaram os grandes vazios encontrados posteriormente durante o ATO, Galeria e Capelas 1 e 2, e não possibilitaram associar parte das fraturas observadas com a natureza do evento que as originou (relaxamentos durante a construção do antigo túnel). A não detecção dos grandes vazios pelas sondagens e a não identificação de fraturas associadas ao relaxamento do maciço contribuíram para que não fossem tomadas decisões de adequação das especificações técnicas construtivas para aplicação do *NATM* ainda na época de elaboração do projeto básico. Portanto, antes da contratação e início das obras de reescavação, pois não sugeriam preocupantes dificuldades construtivas a serem contempladas nos termos de contrato com a Empresa construtora. Na seção geológica da figura 9 estão indicadas as posições onde foram encontradas as Capelas 1 e 2 durante o ATO no trecho crítico.

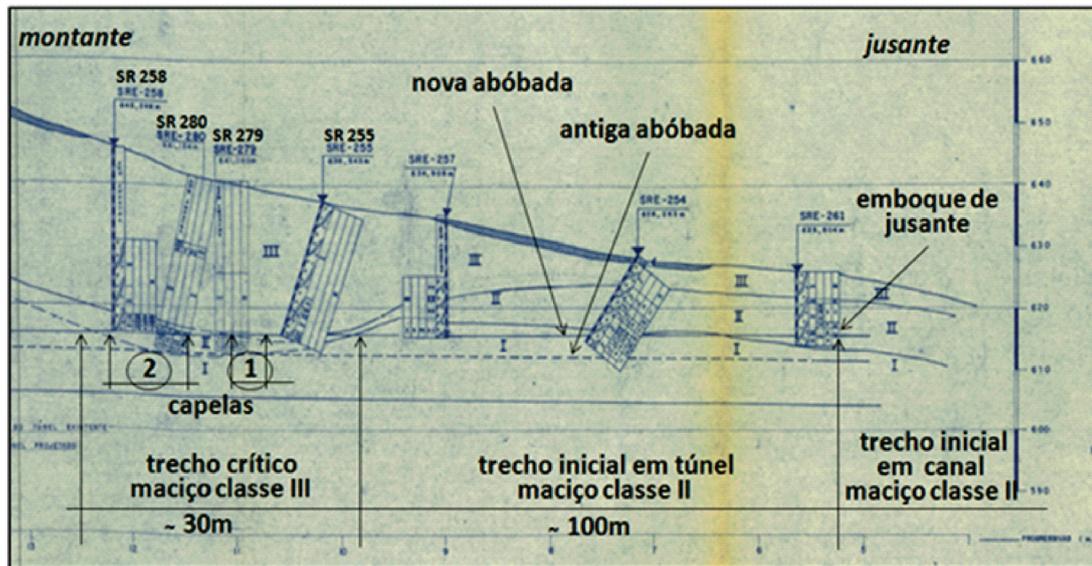


Figura 9 – Seção pelo eixo do túnel, agora com a locação das Capelas 1 e 2 encontradas posteriormente durante o ATO no trecho crítico – maciço classe III (IPT, 1980).

Como mencionado, a Capela 2 não chegou a ser detectada pelas sondagens. A existência dela foi inferida a partir do mapeamento das superfícies de reescavação realizado passo a passo

durante o ATO, o que possibilitou estabelecer o contorno da base dessa Capela 2 no contato com o concreto da abóbada, conforme indicado na figura 10.

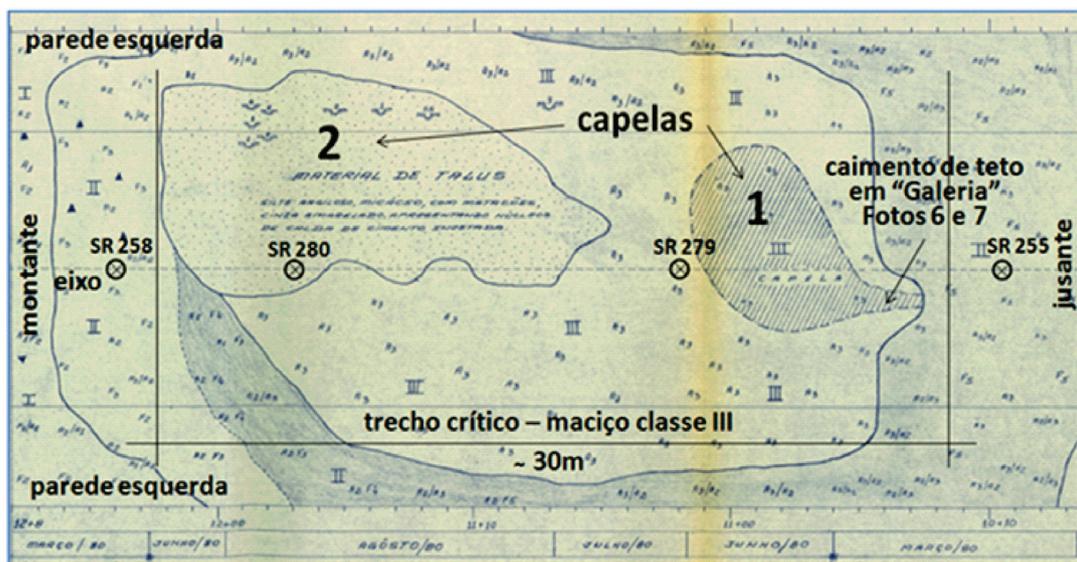


Figura 10 – mapeamento (as built) da superfície de reescavação da abóbada do túnel no trecho crítico – classe III, indicando as Capelas 1 e 2, sondagens próximas realizadas para o projeto básico, com possível posição projetada na abóbada do túnel reescavado (IPT, 1980).

Analisando a posição das sondagens, da Galeria e das Capelas 1 e 2 em relação ao eixo do túnel nas figuras 9 e 10, pode-se “atribuir à casualidade” o fato das sondagens não terem detectado

esses grandes vazios. A Galeria e Capela 1 totalizam extensão de 8,5m ao longo do eixo e ficou entre duas sondagens realizadas. A Capela 2, apesar de ter extensão de 13,0m ao longo do eixo, apareceu

tangenciando esse eixo, ou seja, pequenos desvios que possam ter ocorrido nas perfurações de sondagens próximas teriam sido suficientes para que elas detectassem apenas as bordas desses grandes vazios (bordas da base do cone representado pelas Capelas). E o desvio aventado é factível, pois o bandamento do granito gnaisse mergulha para o interior da ombreira e as perfurações, nesse caso, tenderiam a se desviar no sentido contrário, ou seja, perpendicular a esse bandamento, desviando-se em direção à parede direita.

A programação ideal para a campanha de investigações teria sido combinar a realização de dois serviços investigatórios, com sondagens geofísicas antecedendo à realização das sondagens mecânicas. A geofísica (métodos sísmico e/ou eletrorresistivo) seria uma opção de investigação indireta e contínua (seções em malha), que poderia ter detectado as feições anômalas entre as sondagens, sobre as quais poderia ser programada a realização de sondagens complementares. Entretanto, na época do projeto básico (1978), havia ainda limitações tecnológicas desses métodos para aplicação confiável no contexto morfológico da ombreira esquerda (alta declividade), fato que não estimulou a realização desse serviço.

Assim, não se dispondo de informações de *as built* do antigo túnel e não tendo sido possível a detecção dos grandes vazios, optou-se por deixar para a fase de ATO a possibilidade de se encontrar feições que recomendassem a alteração das especificações construtivas do NATM.

4.2 Aprendizado com o ATO – Acompanhamento Técnico da Obra

Conforme objetivos do presente relato, serão feitas referências ao ATO realizado apenas nos trechos inicial e crítico, em razão das peculiaridades encontradas e vivenciadas com a reescavação de abóbada do túnel nesses trechos.

Durante a fase de escavação do trecho a céu aberto em canal no maciço classe II foi possível observar um cenário de estabilidade favorável à época das obras do antigo túnel, em razão da adequada espessura do maciço classe II sobre a abóbada do túnel – maior que um diâmetro do túnel (>8,0m). Foi notado nesse trecho que ocorreram apenas pequenas quedas de blocos, que não

desarticulavam a autossustentação do contorno da escavação da época de construção.

Esse cenário favorável também ocorreu nos primeiros 70m, dos 100m do trecho inicial em obra subterrânea. Nos últimos 30m desse trecho, a seção da figura 9 indicava uma diminuição da espessura do maciço classe II (<4,0m) e, associado a essa menor espessura, começou a ficar evidente que ocorreram quedas mais frequentes de blocos na época de construção do antigo túnel, dando origem a *overbreaks* que instabilizavam o contorno da escavação, casos testemunhados também pelo madeiramento que ficou embutido no concreto de 1ª fase do antigo túnel (usado antes de se completar a concretagem final), conforme mostra a figura 8.

A constatação de ocorrência desses *overbreaks* e escoramentos foram ficando mais frequentes, até que apareceu o vazio em Galeria, mostrado na figura 8, dando acesso à Capela 1, com 6,0m de altura, situada no que poderia ser chamado de contato brusco entre as classes II e III. Ou seja, essa evidência passava a ser indicativa de comportamento desfavorável do maciço classe III, trecho crítico, não só na época de escavação do antigo túnel, como para reescavação do novo túnel.

Diante dessa evidência, houve a 1ª constatação de que as especificações construtivas deveriam ser adequadas à nova realidade geotécnica do maciço e aos princípios do NATM. Ou seja, essa adequação implicaria em paralisação das reescavações para tratamento do maciço, por meio de enchimento de vazios com solo e injeções de consolidação desse solo, através de enfilagens mancheteadas, usando-se tubos metálicos (tipo Schedule 40, diâmetro de 4”), que também desempenhariam a função de proteção da estabilidade de abóbada na retomada dos avanços da reescavação.

Análises foram feitas dessa alteração de especificações técnicas e concluiu-se que haveria um atraso de cronograma, não só para o tratamento recomendável, como para prover a obra de equipamentos e materiais necessários. Ou seja, procurou-se outra solução, estranha aos princípios do NATM, que implicasse em menor perda de tempo (1ª alternativa mencionada nos dois últimos parágrafos do item 3.2). Assim, ficou decidido que a Capela 1 deveria ser tratada com concreto projetado e tirantes, para possibilitar a retomada das reescavações por baixo desta, no menor prazo possível.

Ao mesmo tempo, foi determinado que, em paralelo a esse tratamento então adotado para a Capela 1, fosse iniciado o avanço das reescavações por montante desse trecho crítico, partindo-se do maciço classe II, aplicando-se chumbadores inclinados no maciço da abóboda a ser reescavada (vergalhões de 1" de diâmetro), apoiados em cambotas solidarizadas ao maciço com aplicação de concreto projetado, cujo objetivo era o de se tentar conter desarticulações de blocos da abóboda. Ou seja, com esse procedimento nos avanços por montante esperava-se ganhar o tempo que estaria sendo perdido com aplicação de projetado e tirantes na Capela 1. E assim foi feito, iniciando-se o avanço por montante do trecho de maciço classe III, novamente com procedimentos estranhos aos princípios do *NATM*.

Logo nos primeiros passos de avanço por montante, houve uma ruptura de frente de reescavação, no ato da detonação do passo de avanço, o que gerou a queda de grande quantidade de material rompido para o interior do túnel (solo e pequenos blocos de saprolito e rocha alterada), fechando-o completamente. E a ruptura não se auto estabilizou, propagando-se pelo interior do maciço até a formação de um abatimento na superfície da ombreira (subsidência), com aproximadamente 15m de diâmetro e situada a uma altura de 30m da abóboda do antigo túnel. O cenário resultante foi de muita apreensão, pois a cavidade gerada em superfície dava sinais de não estar estabilizada, com seu diâmetro evoluindo por queda de paredes, colocando em risco a calha do vertedor de superfície que estava bem próxima e operava o desvio de 2ª etapa de construção da barragem.

Devido às apreensões com a continuidade do alargamento progressivo do perímetro da cavidade aberta em superfície e das dificuldades de acesso a esse local da ombreira, optou-se por tentar estabilizar os deslocamentos das paredes da cavidade com aplicação de tela e concreto projetado, ao invés de se tentar criar acesso para se aterrar essa cavidade o mais breve possível, como seria o recomendável de acordo com os princípios

do *NATM*. Analisando-se a provável causa dessa ruptura, concluiu-se que, possivelmente, deveria existir uma cavidade vazia, ou preenchida por solo não consolidado, logo atrás da última frente de avanço onde ocorreu a ruptura, formando a Capela 2, que não continuou estável como o que ocorreu quando se encontrou a Capela 1 (em cavidade estável). Ou seja, essa ruptura passava a ser mais uma confirmação de comportamento desfavorável do maciço classe III.

Diante dessa nova evidência, houve a 2ª constatação de que as especificações construtivas deveriam ser adequadas à nova realidade, agora também pelo avanço por montante. Assim sendo, foi tomada a decisão de se adequar as especificações construtivas aos princípios do *NATM* para todo o trecho crítico. A Capela 1, onde já havia sido finalizado o tratamento com concreto projetado e tirantes, foi preenchida com solo, assim como foi a cavidade do abatimento na superfície da ombreira. Em seguida, foi iniciada a aplicação das enfilagens mancheteadas, de jusante a montante, a partir das quais foram realizadas as injeções de consolidação, o que possibilitou a retomada das reescavações, tanto pela frente de jusante como de montante.

A fim de se tentar ilustrar a distribuição espacial das Capelas 1 e 2, bem como do cone de ruptura e do abatimento de superfície, apresenta-se uma antiga foto de desenho de progresso de ATO (figura 11), que ficava colada no mural da sala do pessoal de campo. Neste desenho pode-se notar que a Capela 1 indicava o tratamento finalizado e a cavidade preenchida, com aplicação de enfilagens de jusante a montante, de acordo com o avanço da frente de jusante. No lado da Capela 2, pode-se notar indicações de enfilagens cruzadas realizadas simultaneamente para tratamento da zona de ruptura da Capela 2, que supunha-se ser, no local da ruptura, parecido com o estreitamento de um funil. A figura 12 ilustra aspectos da retomada de avanços em maciço de enchimento consolidado pelas injeções em manchetes das enfilagens.

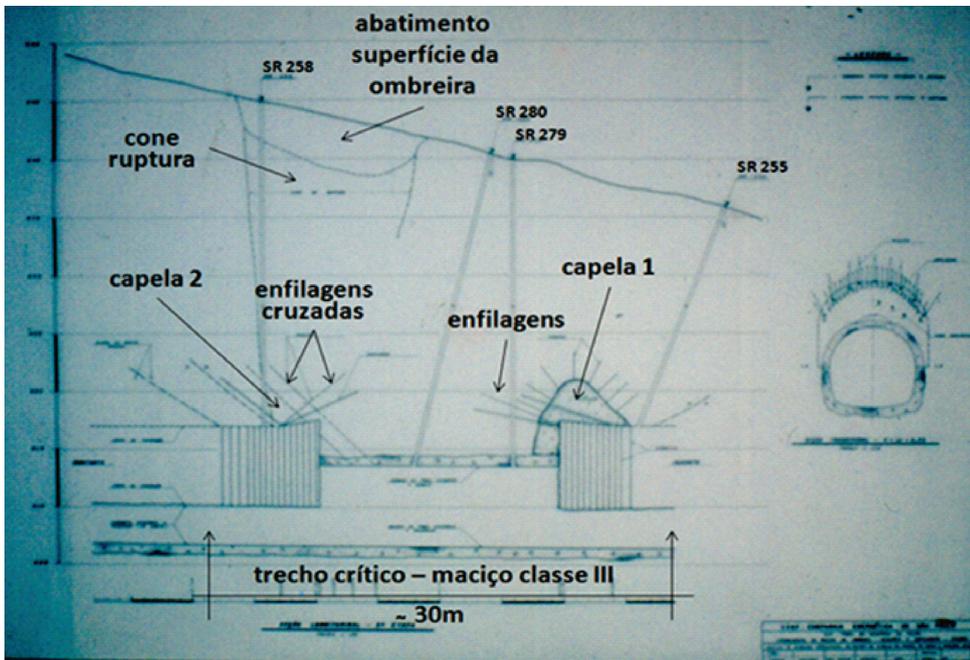


Figura 11 - Antiga foto de desenho de ATO, mostrando a distribuição espacial das Capelas, a possível geometria do cone de ruptura e dos serviços executados: (1º) ao se encontrar a Capela, optou-se por garantir a estabilidade encontrada com tratamento via aplicação de projetado e tirantes; (2º) durante tratamento da Capela 1, foi iniciada escavação por montante, com aplicação de leque de vergalhões chumbados para proteção de desarticulação do maciço da abóboda, aplicando-se concreto projetado e cambotas nos avanços; (3º) houve ruptura da escavação por montante; e (4º), decidiu-se por retomar escavação a partir de jusante, local da Capela 1, com enchimento desta por solo e aplicação de enfilagens injetadas, até se ultrapassar o trecho de ruptura no local da Capela 2. (arquivo pessoal)

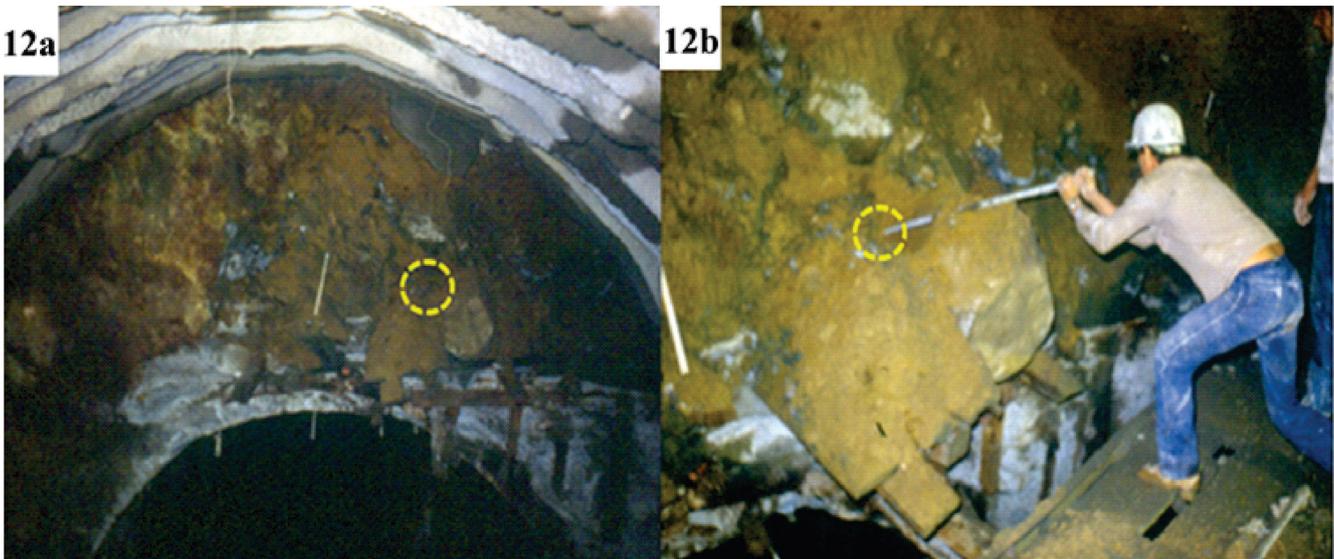


Figura 12 - Aspectos da retomada de avanços no local da Capela 1, com detalhes do maciço de enchimento consolidado por enfilagens injetadas (manchas cinza). As frentes em material de solo injetado foram escavadas manualmente, também pela presença do madeiramento. Os círculos indicam mesmo ponto nas fotos (arquivo pessoal)

5 REFLEXÕES

Cabe destacar que o aprendizado aqui relatado é de cunho pessoal, mas resultou de profícuo relacionamento integrado com diferentes

especialidades, de várias equipes técnicas, direta ou indiretamente envolvidas, de diferentes empresas, como as do IPT e de seus Consultores, Concessionária e seus Consultores, da Projetista e da Empreiteira e seus Consultores.

Do aprendizado relatado observa-se que em qualquer das três épocas focadas na presente abordagem (final da década de 1950, com a construção do antigo túnel, final da década de 1970 com a reescavação do antigo túnel e dias atuais em 2015), as equipes de Engenharia de Projeto de túneis ressentem-se ainda da utilização rotineira de modelo tridimensional que integre informações sobre os maciços, internas e externas ao contorno dos túneis, notadamente nos trechos considerados críticos diante das escavações, quer pelas características geológicas, hidrogeológicas, geomorfológicas, geotécnicas e de anisotropia de tensões dos maciços, quer por interferências existentes acima dos túneis, relacionadas a obras enterradas e de uso e ocupação superficial.

É largamente sabido que assegurar a qualidade e confiabilidade na construção desses modelos integrados aos projetos é condição indispensável à redução de riscos geotécnicos e financeiros de empreendimentos. Ou seja, é necessário que a Geologia de Engenharia aplicada a projetos e obras subterrâneas aprimore a construção automatizada de modelos geológicos e geotécnicos tridimensionais, de forma a possibilitar a desejada integração de dados de investigações, ATO e projeto, cujos objetivos e abrangência devem ser definidos em conjunto com a Engenharia de Projeto.

Para tanto, é preciso combinar recursos especializados de investigações, numa sequência lógica, compreendendo, sem a ela se restringir, a realização integrada de: (1) mapeamentos litoestruturais e das formas de relevo, enfatizando-se a neotectônica e suas relações com a geotecnia e hidrogeologia do maciço; (2) investigações geofísicas, e não simples serviços exploratórios, adotando-se métodos adequados às características físicas do terreno (litoestrutural, hidrogeológica e morfológica do relevo); (3) sondagens mecânicas, com procedimentos normatizados (percussão com SPT e rotativas, com ensaios de perda d'água quando pertinentes e utilização de técnicas de alta recuperação dos testemunhos em trechos friáveis); (4) ensaios geotécnicos de campo e/ou laboratório, visando determinação das características geomecânicas de solos e rochas; e (5) outros recursos específicos, para atendimento às peculiaridades típicas impostas por alguns projetos e terrenos

(interferências e demais demandas da Engenharia de Projeto).

Por outro lado, é de fundamental importância considerar-se a efetiva participação de profissionais sênior em Tecnologias de Investigação, Geologia de Engenharia, Geotecnia e Engenharia de Projeto de Construção de obras subterrâneas, desde o planejamento e programação das investigações, passando pelas análises e interpretações integradas de dados, até à elaboração modelagens geológicas e geotécnicas para projetos, cabendo à Engenharia de Projeto definir o conjunto de dúvidas, incertezas e pendências de adequação de especificações construtivas a serem resolvidas quando da construção da obra e realização do ATO.

Destaca-se que é do conhecimento do meio técnico que esses recursos e procedimentos de investigações especializadas existem e estão disponíveis no mercado nacional há algum tempo. Entretanto, apesar da prática de construção de modelos geológicos e geotécnicos tridimensionais para projetos subterrâneos ainda ser incipiente no País, já é viável nos dias de hoje a construção desses modelos também automatizada, desde a realização das investigações no campo, para possibilitar uma integração rápida e sistêmica com os produtos da Engenharia de Projeto, tanto na elaboração propriamente dita do projeto, como para integração, também automatizada, tanto de dados levantados na realização do ATO, como de retroalimentação destes para adequação de projetos.

Uma dessas ferramentas já em uso no Brasil, por exemplo, parte da utilização do conceito de Gerenciamento do Dado Geotécnico - GDG, conectado ao módulo do BIM Geotécnico - *Building Information Modeling* (De Mío 2015, De Mío et al. 2015).

Agradecimentos

A empresa AES Tietê S.A., atual concessionária da UHE Euclides da Cunha, pela sensibilidade demonstrada por seus dirigentes em acreditar na importância de divulgação de um relevante aprendizado gerado com uma obra inusitada de reescavação de antigo túnel componente de um sistema vertente de sucesso, diante de exigentes demandas técnicas de aproveitamentos hidrelétricos a fio d'água.

Agradecimentos sinceros a todos os antigos colegas do IPT e da equipe de engenharia da CESP, que junto

atuamos nos serviços realizados para a reconstrução da UHE Euclides da Cunha, em especial ao colega Geólogo João Jerônimo Monticeli, pelo incentivo à elaboração desse relato e sugestões ao texto, assim como ao técnico João Marques, companheiro não só presente comigo na obra, como colaborador eficaz na procura de antigos relatórios e documentos que permitiram melhorias significativas na elaboração do presente trabalho. Ao colega Giuliano De Mio, pelas sugestões e colaborações ao longo dos últimos anos e em reconhecimento pelo seu grande otimismo na divulgação da importância do uso de modelos geológicos e geotécnicos computacionais tridimensionais na Engenharia de Projetos de obras civis e mineração. Ao Engenheiro Civil Geotécnico Carlos Augusto Campanhã, reconhecido especialista em projetos e construção de obras subterrâneas com a aplicação do NATM, pelo aprendizado propiciado em discussões ao longo de várias oportunidades.

REFERÊNCIAS

- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2013. Manual de Sondagens. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, Boletim no 03, 5a Edição, São Paulo, SP, 203 p.
- Cardia R.J.R, Lopes W.P., Souza P.R. 2007. UHE Euclides da Cunha – auscultação na galeria do cut off. In: CBDB, Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXVII, Belém – PA, Anais, 17p.
- Carvalho E. 2007. Segurança de barragens: aspectos hidrológicos e hidráulicos. Comitê Brasileiro de Barragens (Apresentação do Tema). In: CBDB, Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXVII, Belém – PA.
- Coppedê A.J. 1989. Relações entre formas de relevo e intemperismo nos terrenos Pré-Cambrianos do leste paulista. Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 152p.
- Coppedê A.J. 1990. Formas de Relevo e Perfis de Intemperismo no Leste Paulista, artigo apresentado no 6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia/IX Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Fundações, v. 1, p. 285-295.
- De Mio G. 2015. Dado geotécnico digital: da aquisição no campo ao BIM geotécnico. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 15, Bento Gonçalves – RS. (artigo aceito)
- De Mio G., Liporaci R.R., Coppedê A.J. 2015. Modelo geológico e investigação integrada para redução de risco na locação de poços de rebaixamento. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 15, Bento Gonçalves – RS. (artigo aceito)
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. 1978. Levantamento Geológico Estrutural da Área de Implantação do Vertedor Tulipa da Barragem de Euclides da Cunha, Relatório IPT nº 11.520.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. 1980. Relatórios técnicos de acompanhamento de obras, s/ nº. UHE Euclides da Cunha, reescavação do túnel de desvio para descarga do vertedor em tulipa.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. 1992. Sismotectônica e dinâmica superficial na área da PCH de Mogi-Guaçu, SP, Relatório IPT nº 30.696, Vol.1 (texto, 285 p.) e Vol. 3 (desenhos, 29 p.).
- Rabcewicz L.V. 1964. The New Austrian Tunneling Method, Part one, *Water Power*, November 1964, 453-457, Part two, *Water Power*, December 1964, 511-515.
- Rabcewicz L.V. 1965. The New Austrian Tunneling Method, Part one, Part Three, *Water Power*, January 1965, 19-24.
- Tognon A.A., Coppedê A.J., Raymundo J.H. 1981. Caracterização geológico geotécnica do maciço rochoso do túnel de descarga do vertedor tulipa da barragem de Euclides da Cunha. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3, Anais, v. 2, p. 413-423.