

## Estado de Tensões Anômalas em Maciços Rochosos no Brasil e seus Efeitos em Obras de Engenharia.

Carlos M. Nieble  
M.Sc, Matra Engenharia e Consultoria

Milton A. Kanji  
Prof. Assoc., Escola Politécnica, USP.

### RESUMO:

O assunto relativo às tensões anômalas em maciços rochosos vem adquirindo importância cada vez maior meio técnico brasileiro, tendo em vista sua ocorrência em obras subterrâneas e a céu aberto de usinas hidrelétricas, em maciços rochosos de gêneses diversas. Os aproveitamentos de Serra da Mesa, Queimado, Itá, Monte Claro e Castro Alves, além de vários outros projetos, são exemplos de obras que conviveram com os vários aspectos do desenvolvimento de tensões anômalas, desde os estampidos e estrondos (“popping rock”), escamamentos, chocos recorrentes, e explosões de rocha (“rock bursts”). Esses fenômenos afetam significativamente a segurança da obra, o cronograma e os custos envolvidos. Este trabalho apresenta os diversos aspectos desses fenômenos detectados em nossas obras e seus efeitos sobre as mesmas, bem como procura conscientizar para a necessidade de sua avaliação prévia e de utilização de técnicas adequadas para enfrentar seus problemas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tensões Residuais, Túneis, Classificação Geomecânica, Ensaios “in situ” (Midea 1971). A partir dessa época, foram realizados ensaios de determinação de tensões

### 1 INTRODUÇÃO

Muitos países já investigaram e desenvolveram procedimentos para implantação de obras em maciços que acumulam tensões anômalas, principalmente os do Norte da Europa, os Andinos e na África do Sul em virtude de suas minas profundas.

No Brasil, essa preocupação começou na década de 70, embora Pichler já tivesse executado medidas na hidroelétrica de Paulo Afonso (Nieble e Guidicini 1971). Um dos primeiros casos registrados se refere aos problemas de descompressão verificados na UHE Capivari Cachoeira, construída na década de 60 (Marques Filho et al. 1971), onde se reportaram fenômenos de “rock burst”.

Os primeiros ensaios de determinação de tensões, depois daqueles realizados por Pichler, foram efetuados pelo IPT de São Paulo na Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. Utilizou-se, na época, a técnica do Stress Tensor Gauge, equivalente ao Cilindro Sensível (Nieble e

em diversas obras de mineração e engenharia civil, que serão mencionadas adiante.

### 2 MÉTODOS USUAIS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES

Os principais métodos de determinação de tensões podem ser classificados pela sua natureza, como segue: *Abertura de fenda plana*: com medição de deslocamentos, ou com reposição das tensões por macacos planos (Rocha et al. 1966); *Sobreperfuração*: medição de estado plano de tensões, com os aparelhos Doorstopper e BDG do USBM; ou de estado tridimensional, destacando-se os aparelhos STT Stress Tensor Tube ou Cilindro Sensível do LNEC, e os cilindros do CSIR (tridimensional stress cell); e *Hidrofraturamento*: em rocha intacta, normatizado pela ASTM; em fraturas orientadas (Cornet, 1986); ou em maciço fraturado (Kanji 1998). O ensaio convencional,

mais simples, é feito como uma extensão do ensaio de perda d'água, para determinar apenas a menor tensão atuante no ponto de ensaio. Cada método apresenta suas vantagens e desvantagens.

### 3 ENSAIOS REALIZADOS NO BRASIL

A necessidade de realização de ensaios de determinação de tensões em nossas obras propiciou a utilização de alguns métodos, principalmente os seguintes: ensaio em fenda plana, macacos planos; borehole deformation gauge – BDG (Fernandes et al. 1994); stress tensor gauge (cilindros sensíveis); e fraturamento hidráulico. Esses ensaios foram realizados pelo IPT-SP, Lab. de Ilha Solteira, LNEC de Lisboa e Lab. de Furnas, sendo que os ensaios de fraturamento hidráulico em rocha intacta foram executados pelo seu idealizador, Haimson (1974). Ensaios com pequeno macaco plano foram executados pela Bureau no Tunel III da Rodov. C. Pinto, para a EP-USP.

Ao nosso conhecimento, foram realizados ensaios nas seguintes obras:

*UHE Ilha Solteira (CESP)*: cilindros sensíveis, mostrando um aumento das tensões com a profundidade e alívio das mesmas nas camadas de brecha basáltica;

*AHE Agua Vermelha (CESP)*: feitos na década de 70, com cilindro sensível, porém seus resultados foram inconclusivos;

*UHE Itaipu*: realizadas determinações com diversos métodos, incluindo cilindros sensíveis, mostrando tensões horizontais um pouco superiores à geostática, calculada pela teoria da elasticidade;

*UHE Serra da Mesa*: Armelin et al. (1994) e Matos e Armelin (1994) relatam as determinações feitas nesse projeto. Foram feitas 20 determinações por hidrofraturamento em rocha intacta, conduzidos por Haimson, em dois furos de sondagem, determinando-se tensões horizontais cerca de 6 vezes superiores às verticais. Em galeria, foram feitos ensaios por macacos planos pequenos, em várias direções, tendo-se registrado tensões máximas da ordem de 35 a 40 MPa e mínimas de cerca de 3 MPa. Ensaios com o STT (tipo LNEC) resultaram em

tensões máximas de 20 a 23 MPa e mínimas de 1 a 5 MPa.

*UHE Queimado*: foram executadas determinações pelo doorstopper e fraturamento hidráulico. Os ensaios com doorstopper mostraram tensões elevadas, o que não foi confirmado pelo ensaio de fraturamento hidráulico, que mostrou estado de tensões consideradas médias. A colagem dos dispositivos no fundo do furo, em rocha não muito sã, foi considerado o problema nos ensaios do BDG.

*UHE Ita*: foram realizados ensaios na superfície rochosa do vertedor auxiliar, por meio de fenda aberta com medida dos deslocamentos e cálculo das tensões por comparação com simulação computacional das tensões para o mesmo deslocamento. Foram também realizados ensaios por hidrofraturamento, a serem mencionados mais adiante.

*Caraíba Mineração*: Fazenda Brasileiro, Baltar (Votorantim); não temos informações a respeito dos resultados de ensaios. A mineração Caraíba apresentava problemas em função dos chocos recorrentes, e as galerias eram protegidas com telas devido à grande queda de blocos;

*Armazenamento de Gás TEBAR*: Em São Sebastião, Petrobrás; realizado pelo método do fraturamento hidráulico, mostrou elevado estado de tensões horizontais.

### 4 HISTÓRICO DE CASOS RECENTES

#### 4.1 UHE Ita.

Foi construída no Rio Uruguai, na divisa dos estados RS e SC, em uma extensa volta do rio, em vale entalhado, com 1.450 MW de potência, compreendendo barragem EFC, vertedores principal e auxiliar, 5 túneis de desvio (TD) e 5 túneis forçados (TF), com recobrimento máximo de 55m..

Todos os túneis apresentaram fenômenos de estalos e deslocamentos da rocha durante sua escavação, relatados por Infanti Jr. et al (1999), resultando em “capelas” no teto, como visto na Figura 1. A rocha, que normalmente seria classificada como Classe I ou II, teve de ser

reclassificada para classes III ou mesmo IV. No Sistema Q, o SRF (Stress Reduction Factor) inicialmente adotado como 1, teve de ser incrementado a valores de 2,5 até 25. Estudo realizado pelo consultor N. Barton indicou que dois derrames pouco espessos (H e I) concentraram tensões residuais elevadas de direção horizontal e anisotrópicas, com magnitude da ordem de 30 MPa (N-S, quase normal ao eixo dos túneis) e 5 MPa (E-W).

Foram realizadas determinações das tensões no túnel TF-5 pelo Laboratório de Furnas, por sobreperforação com o STT (Stress Tensor Tube, modelo do cilindro sensível do LNEC), tendo-se determinado tensões principais maior, intermediária e menor, respectivamente, de 30 a 50 MPa, 5 MPa e 1 MPa. Considerando a tensão vertical atuante, resulta um coeficiente  $K_0$  da ordem de 6 a 10.



Figura 1. Ruptura contínua do teto (Capelas) no túnel da UHE Itá (foto gentilmente cedida por N. Intanti Jr.)

Foram também conduzidos ensaios de hidrofaturamento (Mafra, 2001) segundo metodologia de Kanji (1993), tendo-se determinado que a tensão vertical atuante é de 1 MPa, confirmando os ensaios com o STT e com a tensão calculada. Atribui-se ao entalhamento do vale a concentração de tensões no lado interno da volta do rio, da ordem de 3 vezes as tensões iniciais.

#### 4.2 Complexo Hidrelétrico CERAN.

Na construção do túnel de adução da UHE Monte Claro, do CERAN foram observados

fenômenos de descompressão de intensidade inédita no país.

Trata-se de um túnel de 1.100m de comprimento, com seção em arco retângulo de 12,50m de vão por 12,50m de altura em cogumelo, escavado em calota e bancada. As escavações prosseguiram a contento na calota, quando uma série de estouros e estampidos começou a se verificar, com ejeção de fragmentos lamelares a grandes distâncias (“rock burst”), típicos de fenômenos de descompressão rochosa, resultando em abóbada com “capelas”, como se vê na Figura 2. Os “rock bursts” se iniciaram com reduzido recobrimento, da ordem de 80 m, sendo que sob o recobrimento máximo de 337m os fenômenos também se desenvolveram.. Este fato levou a que tratamentos especiais tivessem que ser aplicados, ilustrados na Figura 3, causando que



Figura 2: Forma do teto do túnel resultante das altas tensões horizontais.

a velocidade de escavação se reduzisse a um terço da escavação normal. Além disso, as curvas de convergência mostraram que a escavação do rebaixo produzia grandes deslocamentos, o que reativava o processo, fissurando o concreto projetado de trechos já suportados.

Os tratamentos foram dimensionados utilizando-se a classificação do índice Q de Barton, na qual o índice SRF, que se refere ao nível de tensões previsto ou constatado na obra, sendo que a qualidade do maciço é inversamente proporcional ao índice. Assim, um maciço com índice Q de 30 (classe B - boa

qualidade), para condições normais de tensões (SRF = 1,0), pode passar para um estado



Figura 3: Tratamentos de reforço do suporte do túnel, notando-se a "capela" devida a "rock burst".

adverso de tensões a  $Q = 0,5$ , portanto de classe E – muito pobre qualidade, com SRF = 60, e exigir tratamentos bastante mais severos.

O grande problema é que a manifestação de tensões anômalas e sua intensidade são de muito difícil previsão na fase de projeto, principalmente para estes maciços, mesmo que se tenha observado condições geométricas favoráveis a altas concentrações de tensões, como vales de rios com curvas acentuadas, encostas íngremes e histórico de grandes alturas de denudação (erosão) no terreno. No caso deste túnel a relação entre a tensão vertical e a resistência da rocha é menor que 0,1, o que segundo Hoek & Brown (1980), corresponderia a situação estável para a escavação, não fazendo supor de antemão a existência de problemas, que ocorreram devido a altas tensões horizontais

O projeto CERAN é complementado por duas outras obras. Na UHE Castro Alves com um túnel de adução de 7,1 Km em construção, a mudança da geometria da escavação, a escavação a seção plena, e a aplicação de tratamentos adequados junto à frente, permitiu avanços maiores e menores problemas decorrentes do estado de tensões instalados (ver Fig. 4). Concreto projetado de alta resistência inicial e tirantes de resina são aplicados junto à frente. Foi solicitado ao IPT-SP um estudo do estado de tensões pelo método de Arthaud, baseado em geologia estrutural.

Na outra hidrelétrica programada, UHE 14 de Julho, onde a curva do rio deixou apenas um túnel de conduto forçado de 200m, sondagens complementares indicaram claramente o "discing" (disqueamento) de rochas, como se pode ver na Figura 5, considerado uma grande evidência de elevado estado de tensões.

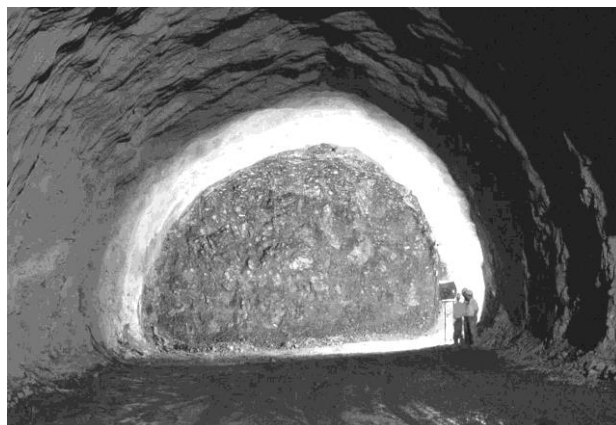


Figura 4: Boa performance da escavação plena do túnel da UHE Castro Alves.

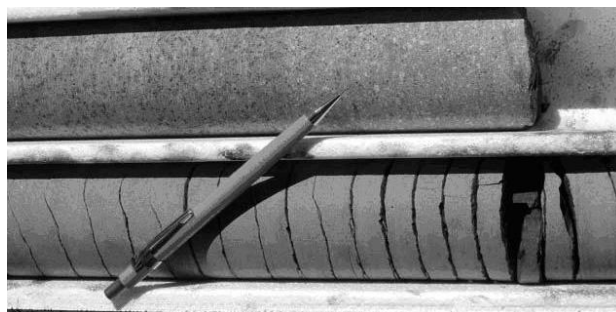


Figura 5: Disqueamento nos testemunhos da sondagem na UHE 14 de Julho (CERAN)

#### 4.3 Túnel de Aparados.

Este túnel localiza-se próximo a Timbé do Sul, no limite dos estados de RS e SC, realizado para a passagem do gasoduto Gasbol da Petrobrás, projetado pela Shaft (1997).

Tem cerca de 5m de diâmetro, 750m de extensão, continuado por "shaft" de 350m de profundidade. O túnel é horizontal e foi escavado em basalto de boa qualidade. O suporte foi dimensionado de acordo com a classificação do Sistema Q.

Nenhum problema foi observado, exceto em um trecho de aproximadamente 20m, a 500m de profundidade, quando ocorreram problemas de altas tensões, representados por estalidos

("popping rock") e explosões de pequenas lascas de rocha ("rock burst"). A excelente rocha seria classificada como classe I, porém o suporte nesse trecho teve de ser o de classe IV (SRF grandemente aumentado). Foi necessário primeiramente aplicar concreto projetado reforçado com fibras, para então permitir condições de segurança para instalação dos chumbadores. Verificou-se que o trecho em questão correspondia a basalto vítreo e sem fraturas, extremamente resistente. Claramente, por ser rocha de maior rigidez, armazenou as tensões. A maiores profundidades, embora com maior recobrimento não se observaram problemas. O túnel está em operação há cerca de 8 anos, sem apresentar problemas.

## 5 CONCLUSÕES.

Algumas obras hidrelétricas em basaltos já apresentaram altas tensões residuais, destacando-se a UHE Ita e o túnel de Aparados do Gasbol, bem com zonas de falhas no leito do rio na UHE Canoas e UHE Itaipu decorrentes de concentração de tensões pela forma do vale em "canyon". Outras obras em maciços metamórficos, tais como as UHEs de Capivari-Cachoeira, Serra da Mesa e Queimado, além do local do futuro depósito subterrâneo de gás em São Sebastião, que levou a estudos intensivos e medidas especiais para contornar tais problemas. O estado de tensões medido na UHE Serra da Mesa e no depósito de São Sebastião (SP) pelo método do fraturamento hidráulico e outros mostram que o estado de tensões horizontais chega a ser várias vezes superior às tensões verticais. O caso verificado no túnel da UHE Monte Claro do CERAN representou um caso extremo de tensões na rocha.

Chega-se à conclusão que diversas obras situadas principalmente no Sul do Brasil apresentaram altas tensões residuais, com coeficientes  $K_0$  de até 6 ou mais, acarretando severos problemas construtivos, diminuição de avanço em túneis, aumento do suporte previsto e, conseqüentemente, mais altos custos.

Recomendamos que em novos projetos, as Projetistas atentem a esses fatos e, sempre que julgado necessário, recomendem a realização

de determinações das tensões do maciço. De posse de uma avaliação apropriada, Projetistas e Construtores poderão adotar procedimentos que evitem ou pelo menos minimizem os efeitos adversos das altas tensões.

Também é necessário que as Proprietárias sejam sensíveis a essa necessidade, aceitando a sua realização que, em última análise, resulta em benefício próprio, principalmente por disporem de cronogramas e previsão de custos realísticos.

Entendemos que o risco deverá ser compartilhado entre a Empreiteira e a Proprietária, descontando-se o risco já assumido baseado nas hipóteses feitas pelo Construtor com base nas evidências locais que porventura existam.

Finalmente, julga-se que se deve apoiar as entidades e laboratórios de pesquisa para que se capacitem em técnicas e equipamentos para a determinação de tensões em rocha, visando diminuir a dependência internacional para os respectivos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- Armelin, J. L., Caproni Jr., N., Matos, M. M. (1994) Análise comparativa de resultados de instrumentação para medição de tensões originais em maciços rochosos, 1º Simp. Brás. Mec. Rochas, CBMR/ABMS, Foz do Iguaçu, p. 3-9
- Cornet, F. H. (1986) Stress Determination from Hydraulic Tests on Pré-Existing Fractures – The HTPF Method, Proc. Int. Symp. *Rock Stress and rock Stress Measurements*, Estocolmo, p. 301-312.
- Fernandes, A. C., Scarpelini, A. F., Serpa, J. R., Coelho, L. F. M., Magalhães, F e Armelin, J. A. (1994) Determinação do estado de tensões "in situ" com o uso do Borehole Deformation Gage – BDG, 1º Simp. Brás. Mec. Rochas, CBMR/ABMS, Foz do Iguaçu, p. 43-58.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980) *Underground Excavation in Rock*, IMME, 527 pp.
- Infanti Jr., N., Tassi, P. A., Mazzutti, R., Piller, M., Mafra, J. M. Q. (1999) Tensões residuais nas obras subterrâneas da UHE Itá, XXXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Com. Bras. Barragens. B. Horizonte, 21pp.
- Kanji, M. A. (1993) Aplicación de las pruebas de hidrofracturamiento a la investigación y diseño de tuneles a presión y cavernas para centrales hidrelétricas, 1º Simp. Nacion. Mecán. Rocas, Lima, Peru, 9 pp.
- Kanji, M. A. (1998) Experiences with Hydro-Jacking tests for the state of stress determination in jointed

- rock masses, *Design and Constr. In Mining, Petrol. and Civ. Eng.*, Proc 5th South Amer. Conf. Rock Mech, Santos, p. 99-105.
- Mafra, J. M. Q. (2001) Estudo de Tensões Virgens em Maciços Rochosos: o Caso UHE Itá, Dissert. Mestrado, Esc. Minas, UFOP, Dep. Eng. Civil, Ouro Preto.
- Marques Filho et al., (1971) Fenômeno de Descompressão nos Túneis do Aproveitamento Capivari-Cachoeira, 1971, 3ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, Tema 1, p. 135-157.
- Matos, M. M. e Armelin, J. L (1994) Tensões originais do maciço rochoso de Serra da Mesa, 1º Simp. Bras. Mec. Rochas, CBMR/ABMS, Foz do Iguaçu, p. 93-99.
- Nieble, C. M. e Guidicini, G. (1971) Vinte anos de ensaios de Mecânica das Rochas aplicada às fundações de barragens, no IPT, SP, 7º Seminário Nacional de grandes Barragens, 1971
- Nieble, C. M. e Midea, N. (1971) Métodos de determinação de Tensões virgens em Maciços Rochosos, 3ª Semana Paulista de Geologia Aplicada.
- Shaft Consultoria Ltda. (1997) Relatório Descritivo do Projeto da Passagem Subterrânea do Aparados (Gasbol), R. Janeiro.