

Metodologia para a Definição de Níveis de Controle para Deslocamentos em Barragens de Terra e Enrocamento a Partir da Redução de Resistência ao Cisalhamento

Pablo Gonçalves

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech, América do Sul, Brasil, pablo.goncalves@tetrattech.com

Renan Campos

Engenheiro Civil, Tetra Tech, América do Sul, Brasil, renan.campos@tetrattech.com

Bernardo Silva

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech, América do Sul, Brasil, bernardo.silva@tetrattech.com

Christine Alfradique

Engenheira Geotécnica, Tetra Tech, América do Sul, Brasil, christine.alfradique@tetrattech.com

Hernán Carvajal

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech, América do Sul, Brasil, hernan.carvajal@tetrattech.com

RESUMO: Ao longo da operação de uma barragem de terra e enrocamento é notória a necessidade de um sistema de monitoramento que seja robusto e eficaz para garantir a segurança deste tipo de estrutura geotécnica. De forma complementar aos instrumentos piezométrico/freático convencionais, verifica-se a necessidade de observações no campo das deformações e deslocamentos como garantia de atendimento ao critério de Estado Limite de Serviço. Inclínômetros, prismas e marcos superficiais são instrumentos comumente utilizados para esse fim, em uma análise usualmente avaliada como estatística ou qualitativa. Com o avanço dos modelos numéricos, é possível prever o comportamento dos deslocamentos em uma estrutura e determinar níveis de controle por meio de análises tensão x deformação acoplados com o fator de redução de resistência ao cisalhamento "Shear Strength Reduction" (SSR). No entanto, a priorização dos controles piezométricos sobre os deslocamentos muitas vezes resulta em uma abordagem estatística ou negligência desses dados. Neste contexto, o artigo propõe uma metodologia que utiliza modelagem por elementos finitos e a técnica SSR para simular cenários de falha e estimar deslocamentos finais. Essa abordagem será demonstrada na modelagem de uma barragem de aterro compactado, com resultados a serem discutidos em termos de vantagens e limitações e revelando que esta técnica pode ser uma estratégia interessante para a definição de níveis de controle para instrumentos de deformações e deslocamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Níveis de Controle, Deslocamento, Barragens, Monitoramento, Redução de Resistência.

ABSTRACT:

Throughout the operational stages of an earthfill and rockfill dam, the need for a robust and effective monitoring system to ensure the safety of such geotechnical structures is evident. In addition to conventional piezometric/phreatic instruments, there is a need for CAMPO observations of strains and displacements to ensure compliance with the Serviceability Limit State criterion. Inclinometers, prisms, and surface markers are commonly used instruments for this purpose, typically evaluated through statistical or qualitative analysis. With the advancement of numerical models, it is possible to predict displacement behavior within a structure and determine control levels through stress-strain analyses coupled with the Shear Strength Reduction (SSR) factor. However, prioritizing piezometric controls over displacements often leads to a statistical approach or neglect of displacement data. In this context, the article proposes a methodology that utilizes finite element modeling and the SSR technique to simulate failure scenarios and estimate final displacements. This approach will be demonstrated in the modeling of a compacted earthfill dam, with results to be discussed in terms of advantages and limitations, revealing that this technique could be an interesting strategy for defining thresholds for strain and displacement instruments.

KEYWORDS: Thresholds, Displacement, Dams, Monitoring, Shear Strength Reduction.

1 INTRODUÇÃO

As operações diárias em barragens, principalmente as de rejeitos, requerem um sistema de monitoramento robusto e eficaz em prol da segurança. Para alcançar este resultado, instrumentos capazes de medir deslocamentos, como inclinômetros, prismas e marcos superficiais são elementos essenciais. No entanto, a medição por si só não é o suficiente para garantir a identificação de perigos que podem interferir com a segurança da barragens. Sendo assim, faz-se necessário interpretar os dados de campo e, como parte inerente à fase de projeto, definir previamente níveis de controle que acionarão automaticamente alertas e procedimentos em situações críticas (TARPs).

Os níveis de controle para instrumentos são bastante comuns nos Manuais de Operação de Barragens. Entretanto, o foco é direcionado principalmente em piezômetros e indicadores de nível de água, pois os métodos de cálculo são relativamente mais simples, utilizando análises de equilíbrio limite em condições críticas de lençol freático/piezométrico para alcançar fatores de segurança de referência. Os instrumentos de deslocamento, por outro lado, geralmente são tratados apenas estatisticamente e empiricamente, ou até mesmo completamente negligenciados.

Para barragens existentes, os níveis de controle estatísticos são uma ferramenta eficaz. Medições com um grande tamanho de amostra, passando por vários anos hidrológicos, estações chuvosas e secas, podem fornecer ao projetista um importante referencial sobre que tipo de leituras de deslocamento podem ser esperadas para cada tipo de instrumento. Nesse contexto, valores fora da sequência histórica devem acionar alertas, com equipes operacionais avaliando mais minuciosamente o que levou à mudança de comportamento. Entretanto, os projetistas de novas barragens não podem contar com esse tipo de artifício, já que as estruturas ainda não estão construídas, não havendo medições de monitoramento de campo. O mesmo raciocínio pode ser aplicado a estruturas existentes que serão submetidas a mudanças de carregamento, como elevações, reforços, escavações e/ou modificações significativas no lençol freático/piezométrico.

Desenvolver níveis de controle para casos de estruturas novas ou sujeitas a mudanças de carregamento geralmente envolve lidar com a velocidade de deslocamento, o que pode ser alcançado comparando a diferença entre as leituras de um instrumento em uma escala de tempo. Esta estratégia tem muito mérito e pode fornecer aos engenheiros uma maneira tangível de prever tendências de falhas eventuais. Ter uma referência numérica alvo para cada leitura separada pode complementar a abordagem de velocidade e fornecer informações importantes sobre os mecanismos de falha identificados durante a fase de projeto.

Para alcançar valores numéricos únicos de referência para leituras de deslocamento, é importante desenvolver uma análise detalhada de tensões e deformações por meio de métodos de elementos finitos para a sequência de construção da barragem. A questão, então, é como usar o modelo para identificar esses níveis de controle, e é isso que este artigo visa responder. Desta forma, foi desenvolvida e apresentada uma metodologia baseada na ferramenta "Redução de Resistência ao Cisalhamento" (SSR, na sigla em inglês), com o objetivo de simular cenários de falha, utilizando os resultados para estimar as medidas de deslocamento final.

Para ilustrar a aplicabilidade do método proposto baseado em SSR, o procedimento de definição de níveis de controle será demonstrado na modelagem de uma barragem de aterro homogêneo de elevação única.

2 METODOLOGIA

De acordo com Hammah et al. (2005), a Redução de Resistência ao Cisalhamento (SSR) é conceitualmente uma técnica simples, que envolve a realização de análises de elementos finitos aplicando um fator de redução de estresse (SRF), responsável por reduzir a resistência ao cisalhamento para todos os materiais, até que o talude falhe. No contexto da modelagem numérica, assume-se que a falha ocorre no ponto em que o modelo de elementos finitos não consegue atingir a convergência dentro de uma tolerância especificada pelo usuário. Conforme mencionado por Brinkgreve & Bakker (1991), o SRF pode ser interpretado como um análogo para o Fator de Segurança determinístico, geralmente obtido por metodologias de equilíbrio limite.

Executar SSR em um modelo tensão-deformação necessariamente simulará uma falha na estrutura, pelo mecanismo de instabilidade devido à falta de resistência ao cisalhamento. Como ilustrado pela Figura 1, ao atingir a não convergência, o modelo se expande rapidamente na deformação por cisalhamento, fornecendo uma representação gráfica da superfície de falha. Tendo o mecanismo de instabilização, bem como uma aproximação para a geometria da falha, é razoável esperar que os projetistas sejam capazes de avaliar se essas características são tecnicamente coerentes com os riscos e o comportamento esperado de cada estrutura especificamente projetada.

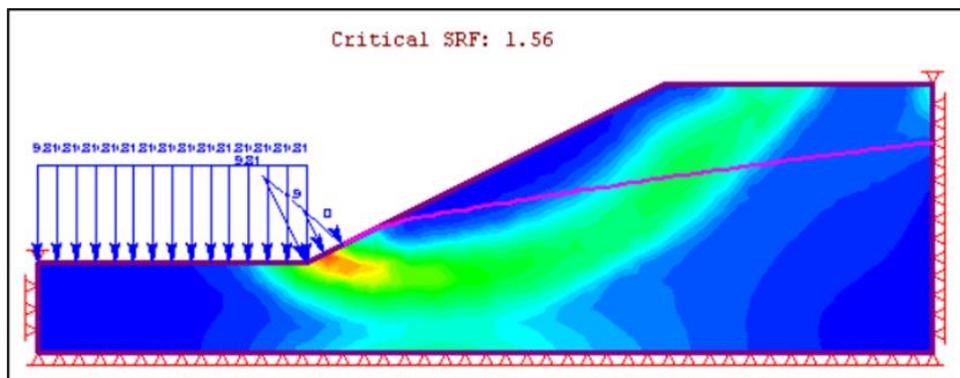


Figura 1. Exemplo de deform. cisalhante indicando o mecanismo da superfície potencial (Rocscience, 2023)

A lógica discutida é a origem para o primeiro passo da metodologia proposta, chamado de "triagem técnica". O objetivo desta fase é validar que a instabilidade física é um modo de falha para a estrutura estudada e que a superfície obtida através do SSR é representativa de uma massa deslizante cinematicamente viável.

Após o processo de triagem, quando os projetistas estão confiantes de que esta é uma metodologia aplicável, o passo 2 consiste em executar um modelo SSR detalhado. Um layout de instrumentos (inclinômetros e pontos de nivelamento) deve ser definido e suas posições inseridas no modelo. Os deslocamentos associados ao momento da falha são então medidos como consultas nas posições dos instrumentos e chamados de ∂_{SRF} .

Após atribuir valores de deslocamento em SRF (∂_{SRF}), o terceiro passo será definir os níveis de controle. Em barragens que estão na fase de projeto, neste ponto é importante levar em consideração os deslocamentos que são esperados devido à consolidação e acomodação. Esses deslocamentos são retirados do modelo tensão x deformação para a sequência de construção, utilizando valores finais de longo prazo ($\partial_{PROJETO}$).

As medições teóricas esperadas de deslocamento no ponto de falha, então, são alcançadas adicionando $\partial_{PROJETO}$ a ∂_{SRF} . No contexto do monitoramento, não é razoável definir um nível de controle ou um aviso de gatilho para valores que indicariam um colapso iminente. É importante determinar pontos de referência que seriam alcançados antes que a falha ocorra, fornecendo às equipes técnicas tempo para corrigir e/ou mitigar problemas identificados. Até esse ponto, os níveis de controle propostos são definidos pelo seguinte guia, onde ∂_{CAMPO} se refere às leituras de instrumentos medidas em campo:

- Operação Normal: $\partial_{CAMPO} < (\partial_{PROJETO} + 0,25 \partial_{SRF})$
- Nível de Atenção: $(\partial_{PROJETO} + 0,25 \partial_{SRF}) < \partial_{CAMPO} < (\partial_{PROJETO} + 0,50 \partial_{SRF})$
- Nível de Alerta: $(\partial_{PROJETO} + 0,50 \partial_{SRF}) < \partial_{CAMPO} < (\partial_{PROJETO} + 0,75 \partial_{SRF})$
- Nível de Emergência: $\partial_{CAMPO} > (\partial_{PROJETO} + 0,75 \partial_{SRF})$

3 ESTUDO DE CASO

Para ilustrar a metodologia proposta, os níveis de controle serão definidos para uma seção transversal típica hipotética com uma barragem de aterro homogêneo de elevação única. A altura máxima da estrutura é de cerca de 21 m, com dois patamares com inclinação de 2H:1V, uma crista com 6 m de largura e uma camada de solo de fundação que se estende até 10 m de profundidade sobre a rocha mãe. A Figura 2 representa a seção transversal mencionada.

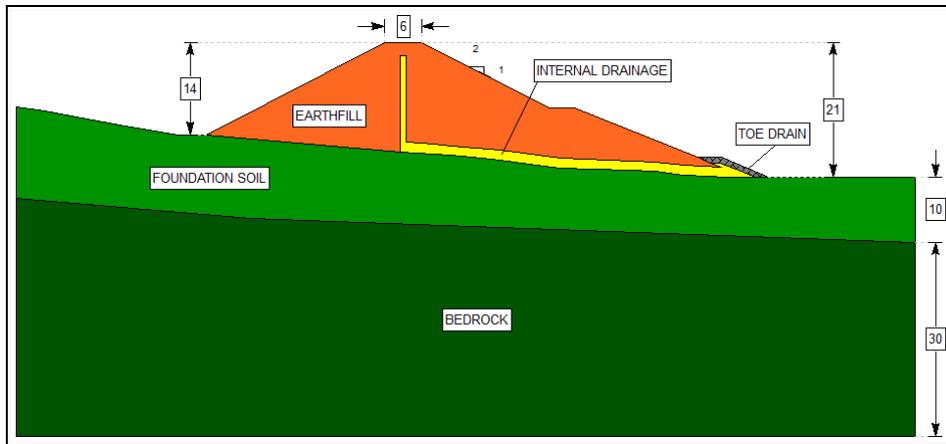


Figura 2. Seção transversal típica adotada para o estudo de caso

Parâmetros geotécnicos típicos também foram definidos para permitir a análise tensão x deformação. A Tabela 1 apresenta os valores adotados, onde γ representa o peso específico, c' é a coesão efetiva, ϕ' é o ângulo de atrito efetivo, E é o módulo de Young e ν é o coeficiente de Poisson.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)	ν
Earthfill (Aterro)	20	10	30	30	0.2
Bedrock (Leito Rochoso)	20	30	45	100	0.3
Foundation Soil (Solo de fundação)	19	20	28	50	0.3
Internal Drainage (Drenagem interna)	20	0	33	40	0.3
Toe Drain (Dreno de Pé)	20	0	35	110	0.3

A instrumentação de deslocamento para a seção transversal típica consiste em dois pontos de nivelamento de superfície (MS-01 e MS-02) e dois inclinômetros com sensores espaçados verticalmente por 3,0 m (INC-01 a INC-12). A Figura 3 apresenta o layout.

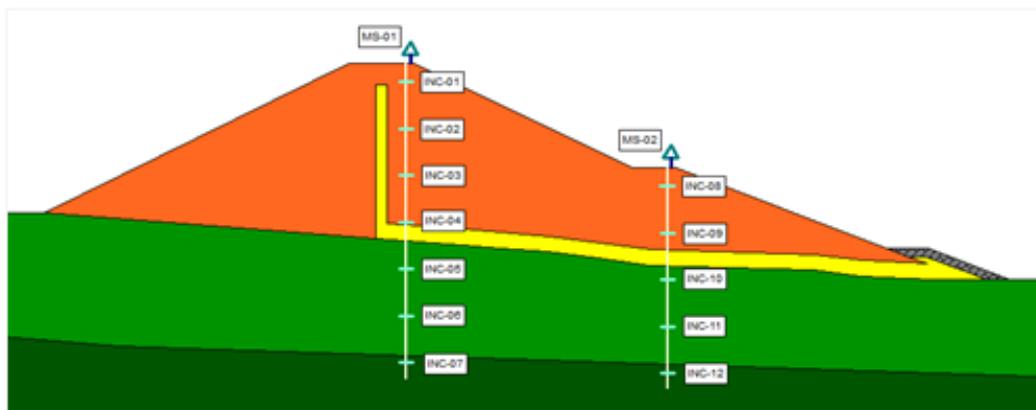


Figura 3. Layout da instrumentação de deslocamento

Com os parâmetros definidos, modelo numérico pronto e layout dos instrumentos disponível, a aplicação do método pode começar. Um exemplo será detalhado passo a passo. O software RS2 da Rocscience foi utilizado para realizar as análises.

3.1 Passo 1 – Triagem Técnica

Antes de considerar qualquer aspecto relacionado aos instrumentos, uma análise SSR é realizada para a condição operacional final esperada. A Figura 4 apresenta os resultados.

É possível notar a existência de uma superfície crítica global de falha. A máxima deformação por cisalhamento possui uma banda de valores mais altos que conecta o reservatório ao pé, passando pela camada de solo de fundação. Para a avaliação do nível de triagem, é razoável concluir que os mecanismos de falha capturados pelo SSR são coerentes com o comportamento esperado para esse tipo de estrutura geotécnica.

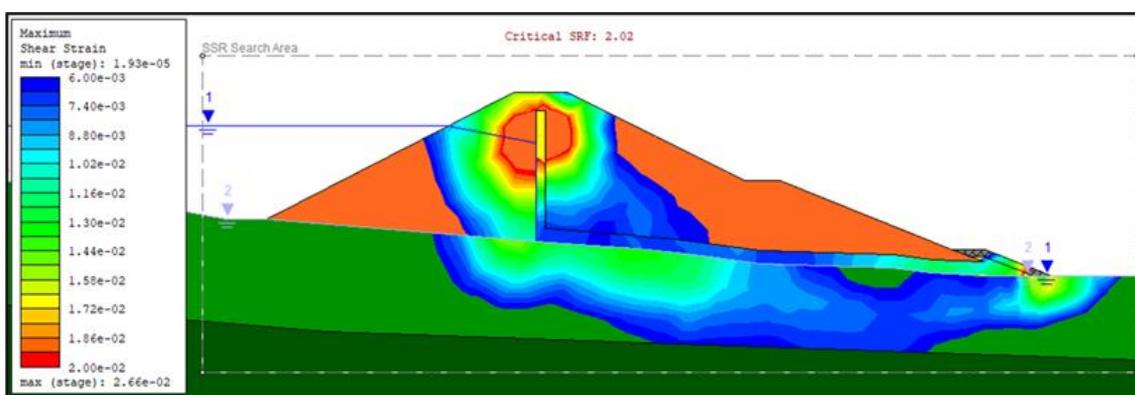


Figura 4. Deformações cisalhantes – Análise de Triagem

3.2 Passo 2 – Modelagem Detalhada SSR

O próximo passo é realizar uma análise detalhada completa de tensão x deformação para a sequência de construção da barragem, a fim de alcançar os deslocamentos de consolidação esperados ($\partial_{\text{PROJETO}}$) no ponto de cada instrumento/sensor. Em seguida, o SSR é executado novamente, com o objetivo de definir os deslocamentos no momento da falha (∂_{SRF}). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2. Resultado das análises detalhadas SSR.

Instrumento	Direção	$\partial_{\text{PROJETO}}$ (cm)	∂_{SRF} (cm)
MS-01	Vertical	-9,58	-30,10
	Horizontal	6,17	15,10
MS-02	Vertical	-7,00	-5,20
	Horizontal	5,11	24,50
INC-01	Horizontal	6,03	18,10
INC-02	Horizontal	5,55	18,00
INC-03	Horizontal	5,08	15,10
INC-04	Horizontal	4,61	11,30
INC-05	Horizontal	4,18	6,49
INC-06	Horizontal	3,39	2,35
INC-07	Horizontal	2,54	6,79
INC-08	Horizontal	5,14	24,40
INC-09	Horizontal	4,87	23,50
INC-10	Horizontal	4,20	17,00
INC-11	Horizontal	3,54	7,12
INC-12	Horizontal	2,81	0,47

3.3 Passo 3 – Definição de Níveis de Controle

Com $\partial_{\text{PROJETO}}$ e ∂_{SRF} , os níveis de controle serão uma relação direta entre eles, seguindo as diretrizes previamente introduzidas. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3. Cálculo dos níveis de controle de deslocamentos

Instrumento	Direção	Normal	Atenção	Alerta	Emergência
MS-01	Vertic.	$\partial_{\text{CAMPO}} > -17,11$	$-17,11 > \partial_{\text{CAMPO}} > -24,63$	$-24,63 > \partial_{\text{CAMPO}} > -32,16$	$\partial_{\text{CAMPO}} < -32,16$
	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 9,95$	$9,95 < \partial_{\text{CAMPO}} < 13,72$	$13,72 < \partial_{\text{CAMPO}} < 17,50$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 17,50$
MS-02	Vertic.	$\partial_{\text{CAMPO}} > -8,30$	$-8,30 > \partial_{\text{CAMPO}} > -9,60$	$-9,60 > \partial_{\text{CAMPO}} > -10,90$	$\partial_{\text{CAMPO}} < -10,90$
	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 11,24$	$11,24 < \partial_{\text{CAMPO}} < 17,36$	$17,36 < \partial_{\text{CAMPO}} < 23,49$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 23,49$
INC-01	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 10,56$	$10,56 < \partial_{\text{CAMPO}} < 15,08$	$15,08 < \partial_{\text{CAMPO}} < 19,61$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 19,61$
INC-02	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 10,05$	$10,05 < \partial_{\text{CAMPO}} < 14,55$	$14,55 < \partial_{\text{CAMPO}} < 19,05$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 19,05$
INC-03	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 8,86$	$8,86 < \partial_{\text{CAMPO}} < 12,63$	$12,63 < \partial_{\text{CAMPO}} < 16,41$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 16,41$
INC-04	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 7,44$	$7,44 < \partial_{\text{CAMPO}} < 10,26$	$10,26 < \partial_{\text{CAMPO}} < 13,09$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 13,09$
INC-05	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 5,80$	$5,80 < \partial_{\text{CAMPO}} < 7,43$	$7,43 < \partial_{\text{CAMPO}} < 9,05$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 9,05$
INC-06	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 3,98$	$3,98 < \partial_{\text{CAMPO}} < 4,57$	$4,57 < \partial_{\text{CAMPO}} < 5,15$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 5,15$
INC-07	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 4,24$	$4,24 < \partial_{\text{CAMPO}} < 5,94$	$5,94 < \partial_{\text{CAMPO}} < 7,63$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 7,63$
INC-08	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 11,24$	$11,24 < \partial_{\text{CAMPO}} < 17,34$	$17,34 < \partial_{\text{CAMPO}} < 23,44$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 23,44$
INC-09	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 10,75$	$10,75 < \partial_{\text{CAMPO}} < 16,62$	$16,62 < \partial_{\text{CAMPO}} < 22,50$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 22,50$
INC-10	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 8,45$	$8,45 < \partial_{\text{CAMPO}} < 12,70$	$12,70 < \partial_{\text{CAMPO}} < 16,95$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 16,95$
INC-11	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 5,32$	$5,32 < \partial_{\text{CAMPO}} < 7,10$	$7,10 < \partial_{\text{CAMPO}} < 8,88$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 8,88$

Instrumento	Direção	Normal	Atenção	Alerta	Emergência
INC-12	Horiz.	$\partial_{\text{CAMPO}} < 2,93$	$2,93 < \partial_{\text{CAMPO}} < 3,05$	$3,05 < \partial_{\text{CAMPO}} < 3,16$	$\partial_{\text{CAMPO}} > 3,16$

4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um esboço breve, porém completo, para definir os níveis de controle aplicados aos instrumentos de medição de deslocamento. Três etapas foram propostas para alcançar esse objetivo, girando em torno da análise de tensão-deformação SSR para seções transversais de interesse. Um estudo de caso hipotético também foi apresentado para ilustrar a aplicação de cada etapa sugerida. Embora a metodologia seja abrangente, algumas considerações são importantes:

- A qualidade dos resultados é uma função direta do nível de detalhe do modelo, incluindo a caracterização dos parâmetros. Análises simplificadas de tensão-deformação sem informações geológico-geotécnicas confiáveis tendem a gerar resultados enganosos.
- Se os deslocamentos de consolidação pós-construção são esperados para se desenvolverem ao longo de vários anos, é importante definir uma faixa de valores para ∂_{DESIGN} , visando ter uma linha do tempo de progressão para os níveis de controle que sejam compatíveis com esse comportamento. A definição pode ser alcançada por meio de análises transitórias de tensão-deformação acopladas.
- A metodologia é diretamente aplicável aos projetos de novas barragens ou para o contexto de estruturas passando por intervenções que resultarão em mudanças de carga. No entanto, o conceito geral pode ser expandido para barragens operacionais existentes, com alguns ajustes mínimos nos passos apresentados.

Por fim, é essencial destacar que os valores fixos de deslocamento para os níveis de controle são uma ferramenta importante para o monitoramento de barragens, pois são capazes de agir em mecanismos de falha específicos, como a instabilização global. No entanto, a avaliação das medições dos instrumentos deve incorporar outras abordagens, incluindo comparação estatística, cálculos de velocidade e correlações entre múltiplos instrumentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brinkgreve, R.B.J., Bakker, H.L. (1991). Non-linear finite element analysis of safety factors. In Proc. 7th Int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechanics. Cairns, Australia, 1117–1122.
- Hammah, Reginald & Yacoub, Thamer & Curran, J. & Corkum, Brent. (2005). The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion.