

UM MODELO TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS FINITOS PARA TÚNEIS COM REVESTIMENTO EM CONCRETO PROJETADO E PRÉ-MOLDADO

Paola M. C. Villalba Fiore¹, Denise Bernaud Maghous² e Américo Campos Filho³

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil Escola de Ingeniería.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Avenida Osvaldo Aranha, 99 – 3o andar, Centro, CEP: 90035-190, Porto Alegre, RS – Brasil
1: pao_villalba@hotmail.com, 2: denise.bernaud@ufrgs.br, 3: americo@ufrgs.br

Palavras-chave: elementos finitos, túnel, viscoelasticidade, viscoplasticidade, ANSYS

Resumo. *Em túneis, a variação das tensões e deformações no revestimento e no maciço é causada pelo avanço da escavação e pelo comportamento a longo prazo do maciço e do revestimento. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo numérico para a análise tridimensional de um túnel no programa ANSYS. O processo de escavação e colocação do revestimento é simulado pelo método da ativação/desativação de elementos em etapas sequenciais. O maciço apresenta comportamento viscoplástico e o concreto projetado e o concreto pré-moldado do revestimento são modelados como materiais viscoelásticos utilizando o modelo da cadeia de Maxwell e de Kelvin, propostos por Bazant. Ambos os modelos são calibrados por comparação com o Código Modelo fib 2010. A utilização do concreto viscoelástico no programa ANSYS é possível pela modificação de uma subrotina que leva em conta o comportamento dos materiais. O túnel revestido é modelado com dois diferentes tipos de revestimento e os dois modelos viscoelásticos. Finalmente, é simulado o túnel experimental Kielder. A comparação destes dados com os resultados do programa ANSYS mostra uma excelente concordância.*

1. INTRODUÇÃO

As soluções de projeto com estruturas subterrâneas, especialmente nas grandes cidades, têm adquirido uma importância crescente, tanto em áreas urbanas como nas zonas montanhosas e o estudo delas é de muita relevância.

A utilização de ferramentas computacionais é fundamental no projeto de túneis. Elas podem representar melhor o problema real e fornecer resultados confiáveis, analisando os parâmetros da modelagem de um túnel.

No projeto de obras subterrâneas os objetivos são a estabilidade local da estrutura e no entorno dela. Os deslocamentos induzidos têm que ser toleráveis em relação à estrutura e às estruturas vizinhas. Quando se faz uma escavação em um maciço rochoso, as tensões do maciço vão se modificando conforme a distância de escavação e o maciço tende a se deslocar para dentro (convergência).

Desenvolve-se neste trabalho, um modelo numérico para a análise tridimensional de túneis em maciços rochosos, utilizando o programa ANSYS. O modelo simula o processo de escavação e colocação do revestimento pelo método da ativação/desativação de elementos. O revestimento de concreto é simulado como concreto projetado ou concreto pré-moldado. O concreto tem comportamento viscoelástico e o maciço tem comportamento viscoplástico. São comparados o comportamento viscoelástico do concreto utilizando o modelo da cadeia de Maxwell e da cadeia de Kelvin. Ambos os modelos são propostos por Bazant [1].

2. LEI CONSTITUTIVA DO MACIÇO VISCOPLÁSTICO

A descrição deste comportamento revela dois conceitos fundamentais: o domínio da elasticidade do material e a regra de fluxo viscoplástica que descreve a evolução do tensor de tensões viscoplásticas.

A formulação em elastoviscoplasticidade está baseada na decomposição do tensor das deformações totais, como mostra a equação (1):

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^{vp} + \underline{\underline{\varepsilon}}^0 \quad (1)$$

Onde $\underline{\underline{\varepsilon}}^e$, $\underline{\underline{\varepsilon}}^{vp}$ e $\underline{\underline{\varepsilon}}^0$ correspondem respectivamente aos tensores de deformação elástica, viscoplástica e inicial.

A relação entre a tensão e deformação, é expressa pela Lei de Hooke na equação (2):

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}} \cdot (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}^{vp} - \underline{\underline{\varepsilon}}^0) + \underline{\underline{\sigma}}^0 \quad (2)$$

Onde $\underline{\underline{\sigma}}^0$ representa ao vetor das tensões iniciais.

O conhecimento da lei de evolução temporal da deformação viscoplástica é necessário quando a tensão deixa de estar no domínio elástico.

No estudo do estado de tensão em um ponto do material elastoviscoplástico, podem surgir as seguintes situações:

Se $\underline{\underline{\sigma}}$ está no interior do domínio elástico, então o critério de viscoplasticidade $F(\underline{\underline{\sigma}}) < 0$ e:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e \quad (3)$$

A taxa de deformação total é puramente elástica, como indica a equação (3).

Se $\underline{\underline{\sigma}}$ está no exterior ou na fronteira do domínio elástico, então $F(\underline{\underline{\sigma}}) \geq 0$ e:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp} \quad (4)$$

A taxa de deformação total é a soma de uma parte elástica e uma parte viscoplástica conforme a equação (4).

A taxa de deformação viscoplástica é escrita como uma lei de evolução expressa na equação (5):

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp} = \underline{\underline{g}}(\underline{\underline{\sigma}}) \quad (5)$$

A função \underline{g} é nula quando $F(\underline{\sigma}) < 0$.

A lei da evolução viscoplástica, descrita nas equações (6) e (7) estão em conformidade com a formulação dada por [2]:

$$\dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{F(\underline{\sigma}, \alpha)}{F_0} \right\rangle^n \frac{\partial G(\underline{\sigma})}{\partial \underline{\sigma}} \quad (6)$$

$$\dot{\alpha} = \left\| \dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} \right\| \quad (7)$$

Onde $F(\underline{\sigma}, \alpha)$ é o critério de viscoplasticidade; $G(\underline{\sigma})$ é o potencial viscoplástico; $\dot{\alpha}$ é a taxa do parâmetro de endurecimento isotrópico; η, n são constantes de viscosidade; e F_0 é a tensão de referência

3. COMPORTAMENTO AO LONGO DO TEMPO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

3.1 Concreto como revestimento de um túnel

Os sistemas de suporte estruturais ao longo do perímetro do túnel têm por objetivo oporem-se aos deslocamentos das paredes e da face do túnel para garantir a estabilidade do túnel e oferecer proteção contra eventuais rupturas locais.

O concreto projetado foi inventado nos Estados Unidos no início do século 20, e desde então tem sido usado como uma camada de proteção para corrosão, fogo e também para revestimento e suporte de túneis, taludes, etc.

Concreto projetado é hoje a técnica dominante para suporte de EM (escavação mineira). É conveniente em túneis com variação de seção, interseções, trechos curtos, cavernas e lugares onde for difícil a introdução de formas ou peças pré-moldadas, enquanto que o revestimento de concreto pré-moldado é a forma mais comum de suporte para túneis de solos moles. Este sistema é conveniente em casos de escavação mecanizada, onde é requerido um progresso rápido em comprimentos longos. Para estes casos as peças de concreto pré-moldado oferecem um método econômico e eficiente como sistema de revestimento.

3.2 Comportamento diferido do concreto

Os materiais viscoelásticos apresentam uma relação tensão-deformação dependente do tempo. No concreto, existem deformações imediatas, que provêm do modelo elástico, e deformações não imediatas, que correspondem ao comportamento viscoso e à retração. No concreto estas deformações se desenvolvem lentamente no decorrer do tempo.

Este fenômeno é mais pronunciado, nas primeiras idades, quando aparecem as tensões.

O concreto possui características que o transformam em um material com comportamento altamente dependente tanto dos carregamentos nele aplicados, quanto do tempo decorrente

e do ambiente no qual está inserido, devido principalmente às questões de umidade e temperatura. Desta forma, segundo o Código Modelo *fib* 2010 [3], pode-se considerar que a deformação total no tempo t , de uma peça de concreto uniaxialmente carregada a partir de um tempo t' com uma tensão constante $\sigma_c(t')$, pode ser expressa segundo a equação (8):

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t') + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (8)$$

Onde:

$\varepsilon_{ci}(t')$ é a deformação inicial, também chamada de instantânea, devido ao carregamento;

$\varepsilon_{cc}(t)$ é a deformação por fluência, resultante para um tempo $t > t'$;

$\varepsilon_{cs}(t)$ é a deformação por retração; e

$\varepsilon_{cT}(t)$ é a deformação térmica.

3.3 Lei do tipo integral para a fluência

A análise das deformações por fluência, decorrentes de tensões em diferentes instantes, por meio da viscoelasticidade, pode ser realizada, normalmente, pela soma das mesmas, dadas pelo princípio de superposição linear dos efeitos [4].

Para simular numericamente os efeitos da fluência e do envelhecimento das estruturas de concreto, Bazant [5] apresentou várias propostas que incluem: um algoritmo para a obtenção da história de tensões no concreto, dado um determinado histórico de deformações prescrito, em um material com viscoelasticidade linear dependente do tempo, avaliação da taxa de fluência para concretos com envelhecimento baseados na cadeia Maxwell e uma metodologia para avaliar o espectro tempo-dependente de um modelo de cadeia Kelvin a partir de dados de fluência fornecidos para o concreto. O método foi baseado em séries expandidas de Dirichlet da taxa de fluência, como uma função da duração do teste de fluência. O tempo de retardação fornece uma regra para a taxa de fluência, a qual é necessária para a análise de grandes sistemas estruturais.

Normalmente, as formulações numéricas para avaliação das deformações dependentes do tempo do concreto levam em consideração dois efeitos distintos, mas que estão intimamente ligados: fluência e retração. O Código Modelo *fib* 2010 apresenta expressões para os dois efeitos.

Somando as parcelas de um histórico de deformações, devido a todos os pequenos incrementos de tensões após um tempo t , a lei da fluência para tensões uniaxiais é expressa na equação (9).

$$\varepsilon(t) - \varepsilon_0(t) = \int_0^t J(t, t') \cdot d\sigma(t') \quad (9)$$

Onde t é a idade atual do concreto, em dias, t' é a idade do concreto no início da aplicação de carga em dias, σ é a tensão total; ε é a deformação total; ε_0 é a deformação inelástica compreendendo entre elas, a retração e a dilatação térmica; e $J(t, t')$ é a função de fluência, ou seja, deformação causada por uma tensão unitária constante atuando em um intervalo de tempo entre t' e t .

O termo t' é fundamental para inclusão de efeitos de envelhecimento, permitindo uma

resposta correta do material de acordo com suas propriedades estruturais. Estas, por sua vez, variam de acordo com a idade de fabricação do material, além do tempo de exposição a agentes agressivos e fatores climáticos (umidade e temperatura).

3.4 Retração do concreto

Denomina-se retração, em inglês, *shrinkage*, ao fenômeno pelo qual o concreto reduz o seu volume, pela perda gradual de água na massa do concreto, durante o processo de endurecimento.

A retração provoca tensões de tração, e consequentemente fissuras, no caso em que o livre encurtamento da peça de concreto esteja impedido. A retração aumenta quando diminui a espessura da peça em contato com o ambiente, por ser o efeito de dessecação maior em relação ao volume da peça. A proteção e a cura prolongada das superfícies, especialmente em tempo seco, são fundamentais para diminuir a retração nas primeiras idades.

Na formulação numérica, a retração é considerada como uma deformação imposta, como foi observada na equação (8). Então, a deformação por retração é subtraída da deformação total.

A retração total, conforme ao Código modelo *fib* 2010 [3] pode ser calculada pela equação (10):

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cda}(t, t_s) \quad (10)$$

A formulação apresentada no *fib* 2010 é função da umidade do ambiente, do tipo de cimento, da resistência do concreto, da idade do concreto, da idade do concreto no início da consideração da retração e da espessura fictícia da peça de concreto.

3.5 Formulações viscoelásticas: modelos reológicos básicos

De acordo com Creus [4] os modelos viscoelásticos são formulados a partir da união de dois elementos reológicos básicos: elementos elásticos (molas) e viscosos (amortecedores). Para o elemento de mola, admite-se uma resposta instantânea e reversível. No caso do amortecedor, considera-se a lei da viscosidade de Newton, onde a taxa de deformação é proporcional à tensão.

As molas e amortecedores podem ser combinados para obter diferentes configurações: a combinação de uma mola com um amortecedor em série corresponde ao modelo de Maxwell e em paralelo corresponde ao modelo de Kelvin.

Os modelos generalizados são produto de combinações destes modelos citados acima: o modelo de Maxwell generalizado é composto pela união em paralelo de vários elementos de Maxwell; e o modelo de Kelvin generalizado é composto pela união em série de vários elementos de Kelvin.

3.6 Cadeia de Maxwell Generalizada

O modelo da cadeia de Maxwell generalizada representa conjuntamente as respostas instantâneas e diferidas. De acordo com Pande [6], no modelo das camadas superpostas, supõe-se que o sólido analisado é composto por várias camadas, superpostas entre si, sendo que cada camada possui propriedades mecânicas diferentes. As camadas sofrem a mesma

deformação total produzindo um campo de tensão diferente, que contribui para o campo de tensão total.

No procedimento do uso da cadeia de Maxwell generalizada é previsto um espectro de relaxação dependente do tempo. A lei de tensão-deformação baseada em uma cadeia de Maxwell é expressa então conforme à equação (11).

$$\sigma = \sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu}, \quad \dot{\epsilon} = \left(\dot{\sigma}_{\mu} + \frac{\sigma_{\mu}}{\tau_{\mu}} \right) / E_{\mu}(t), \quad \text{para } (\mu = 1, \dots, n) \quad (11)$$

Onde σ_{μ} é a tensão atuante na mola μ ; τ_{μ} é o tempo de relaxação relacionado ao elemento μ da cadeia; E_{μ} é o módulo de elasticidade da mola μ , dependente da idade t do concreto; e n é o número de elementos (adota-se $n=5$).

No caso da cadeia de Maxwell, o elemento $\mu = 5$ tem um tempo de relaxação muito grande $\tau_5 \rightarrow \infty$, com o propósito de simular um coeficiente de viscosidade tendendo ao infinito $\eta_5 \rightarrow \infty$. Esta suposição possibilita dizer que o quinto elemento da cadeia trata-se de uma mola isolada, satisfazendo a lei de Hooke e não representando comportamento viscoso. Isto permite que a deformação resulte em um valor assintótico, conforme o comportamento real do concreto.

Os demais tempos de relaxação foram escolhidos de acordo com a equação (12).

$$\tau_1 = 1, \quad \tau_{\mu} = \tau_1 \cdot 10^{\mu-1} \quad \text{para } (\mu = 2, 3 \text{ e } 4) \quad \text{e} \quad \tau_5 = \infty \quad (12)$$

Integrando-se a equação (11), resulta na série de exponenciais reais, representando a função de relaxação da cadeia de Maxwell.

Assim, os valores de E_{μ} podem ser obtidos a partir de uma função de relaxação com valores discretos nos tempos conhecidos. A obtenção da função de relaxação em função da fluência foi baseada no modelo proposto por Bazant [5].

Para conseguir uma ampla representatividade do espectro de relaxação, foram adotados 30 tempos discretos e oito idades de carregamento, iniciando em $t'_1 = 2,8$ dias e a idade final $t'_8 = 8854,28$ dias.

Com a formulação de Bazant consegue-se determinar a curva de relaxação para qualquer idade t' por meio do método dos mínimos quadrados, a partir dos pontos discretos conhecidos da função de relaxação. Assim determinam-se os módulos de elasticidade E_{μ} de cada elemento da cadeia, para qualquer idade de início de carregamento e qualquer tempo de duração de carga.

A consideração do envelhecimento se dá através da atualização dos módulos de elasticidade de cada elemento da cadeia com o passar do tempo, representando uma atualização das relações constitutivas do material quando este está submetido a uma tensão constante (Figura 3).

3.7 Cadeia de Kelvin Generalizada

Este modelo facilita muito a implementação numérica por considerar os parâmetros viscoelásticos, módulo de elasticidade E_{μ} e viscosidade η_{μ} dos elementos, independentes do tempo. Estes parâmetros calculam-se inicialmente através da calibração de um modelo

experimental (Figura 4), e posteriormente ficam constantes durante a análise, como na clássica viscoelasticidade linear.

O envelhecimento é considerado só na mola isolada. Este efeito instantâneo, calcula-se em função do módulo de elasticidade variável ao longo do tempo, pelo método do Código Modelo *fib* 2010 [3]. Estes fatos resultam em uma maior simplificação numérica na análise e torna o modelo da cadeia de Kelvin mais vantajoso que o modelo da cadeia de Maxwell [1].

Devido às informações disponíveis para discretizar o comportamento diferido do concreto normalmente serem apresentados por meio de dados relativos à fluência, as curvas de fluência para cada idade de carregamento são facilmente obtidas. De acordo com Bazant, para este tipo de análise, os passos de tempo, Δt_r , são melhores quando escolhidos valores crescentes com uma taxa de variação constante.

Adotaram-se os mesmos oito tempos de duração de carga e 30 tempos discretos do caso do modelo de Maxwell, para representar a função de fluência de forma adequada. A partir das curvas de fluência geradas pelos pontos discretizados, os valores E_μ para cada elemento da cadeia são encontrados através do uso do método dos mínimos quadrados.

A equação diferencial para uma cadeia de Kelvin sem envelhecimento é dada pela equação (13).

$$E_\mu \cdot \varepsilon_\mu + \eta_\mu \cdot \dot{\varepsilon}_\mu = \sigma \quad (13)$$

Onde E_μ é o módulo de elasticidade do elemento μ da cadeia; η_μ é a viscosidade do elemento μ da cadeia; e ε_μ é a deformação do elemento μ da cadeia.

Integrando a equação (13) para uma tensão constante σ aplicada em uma idade t' , em uma cadeia de n elementos Kelvin, resulta a deformação viscosa na equação (14).

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sigma \sum_{\mu=1}^N \frac{1}{E_\mu} \cdot (1 - e^{-(t-t')/\theta_\mu}) \quad (14)$$

Onde θ_μ é o tempo de retardação, dado pela equação (15).

$$\theta_\mu = \frac{\eta_\mu}{E_\mu} \quad (15)$$

Para calibração do modelo Kelvin generalizado foram considerados, neste trabalho, tempos de retardação fixos, representados pela equação (16).

$$\theta_1 = 1, \quad \theta_\mu = 10^{\mu-1} \cdot \theta_1 \quad \text{para} \quad \mu = 2, \dots, 5. \quad (16)$$

O uso de um algoritmo exponencial possibilita gradualmente o crescimento do valor dos passos de tempo a valores muito superiores ao menor tempo de retardação, mantendo a estabilidade e boa precisão.

3.8 Formulação da fluência do Código Modelo *fib* 2010

No caso da viscoelasticidade linear, o material obedece ao princípio da superposição aplicado às histórias de tensão e deformação. Desta forma, o Código Modelo *fib* 2010 apresenta uma formulação da função de fluência, válida para concretos submetidos a uma tensão máxima menor do que $0,4 \cdot f_{cm}$ e sob um carregamento aplicado no tempo t' , como se mostra na

equação (17).

$$J(t, t') = \frac{1}{E_c(t')} + \frac{\varphi(t, t')}{E_c} \quad (17)$$

Onde $J(t, t')$ é a função de fluência, que representa a deformação na idade t , causada por uma tensão unitária constante, atuante durante um intervalo $t-t'$; $E_c(t')$ é o módulo de elasticidade na idade t' ; $\varphi(t, t')$ é o coeficiente de fluência; e E_c é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade.

A formulação considera a influência do tempo, da umidade, da espessura fictícia da peça, da temperatura, do tipo de cimento e da resistência do concreto.

3.9 Calibragem do modelo de Maxwell e Kelvin para concreto viscoelástico

Comparam-se as curvas de fluência, para oito diferentes tempos t' de aplicação da carga, obtidas com as fórmulas propostas pelo Código Modelo *fib* 2010 [3] e as obtidas do modelo computacional deste trabalho utilizando os modelos da cadeia de Maxwell e de Kelvin.

Algumas das curvas obtidas na calibragem podem ser vistas nos gráficos da Figura 1 e Figura 2:

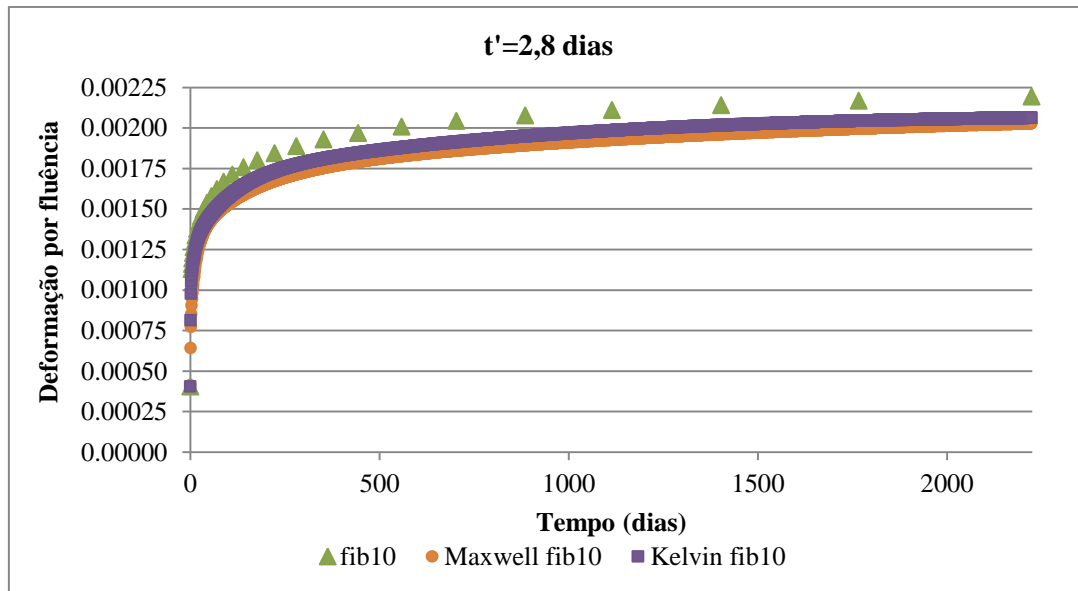


Figura 1: Curvas de fluência obtidas pelo *fib* 2010 e modelos computacionais para $t'=2,8$ dias.

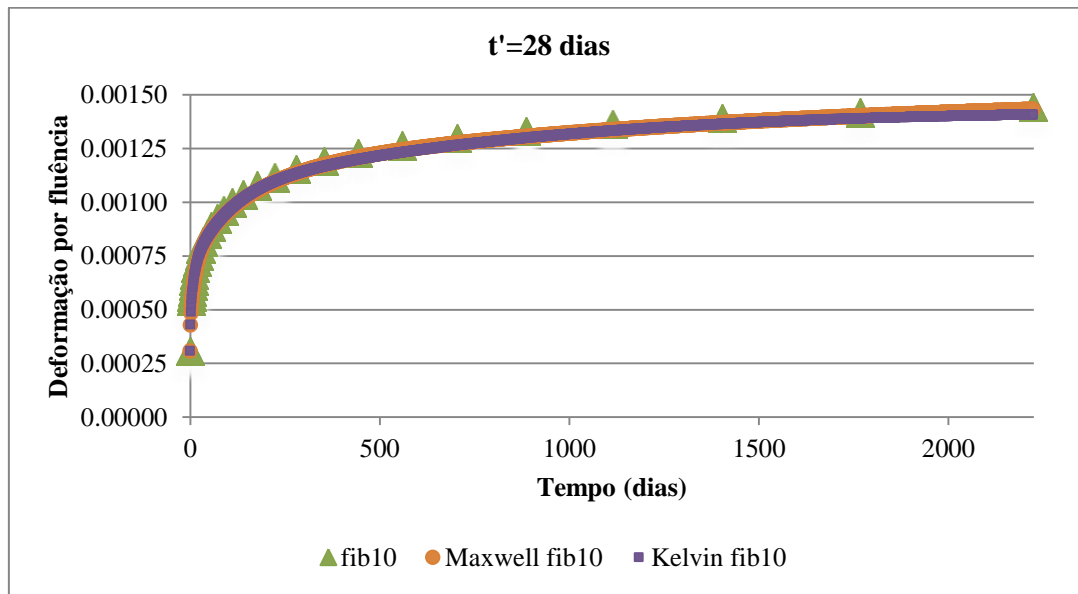


Figura 2: Curvas de fluência obtidas pelo *fib* 2010 e modelos computacionais para $t' = 28$ dias.

Nas curvas acima pode-se observar que o efeito da fluência é função da idade do concreto quando a carga foi aplicada e da duração do carregamento. Quanto maior o tempo de aplicação da carga, maior a deformação, e quanto maior a idade do carregamento, menor a deformação. Por tudo isso, o concreto é classificado como um material viscoelástico com envelhecimento.

As curvas de fluência obtidas pelo *fib* 2010 e os modelos computacionais apresentam uma correspondência muito satisfatória.

4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL NO ANSYS

O programa ANSYS permite adequar o programa às necessidades do usuário por meio da incorporação de sub-rotinas escritas em linguagem Fortran. Compilando a sub-rotina é criada uma biblioteca dinâmica que permite executar uma versão vinculada do programa.

Na simulação são comparados os modelos da Cadeia de Maxwell e de Kelvin, para concreto projetado e pré-moldado.

A lei de comportamento viscoelástico (Modelo da cadeia de Maxwell e da Cadeia de Kelvin) para o concreto será incorporada por meio da sub-rotina *usermat* para o caso 3D. Esta sub-rotina permite que a formulação do material seja modificada pelo usuário, escrevendo as próprias equações constitutivas do material. A sub-rotina é resolvida para cada elemento, para cada ponto de integração, em várias iterações, e segue os passos da Figura 3 e Figura 4.

Na Figura 3 EMU é a matriz de módulos elásticos para os oito tempos de carregamento.

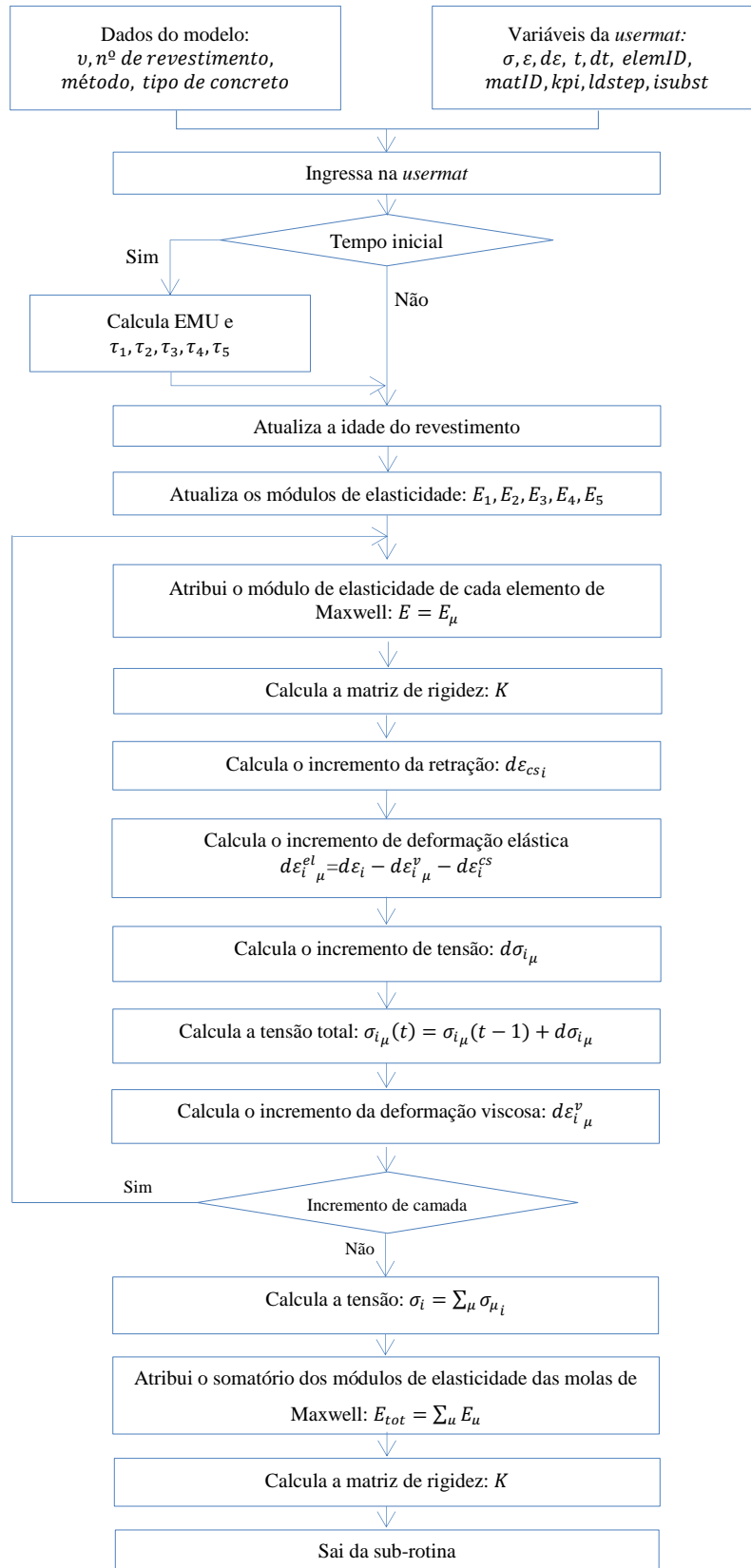


Figura 3: Fluxograma da *usermat* para o caso da Cadeia de Maxwell.

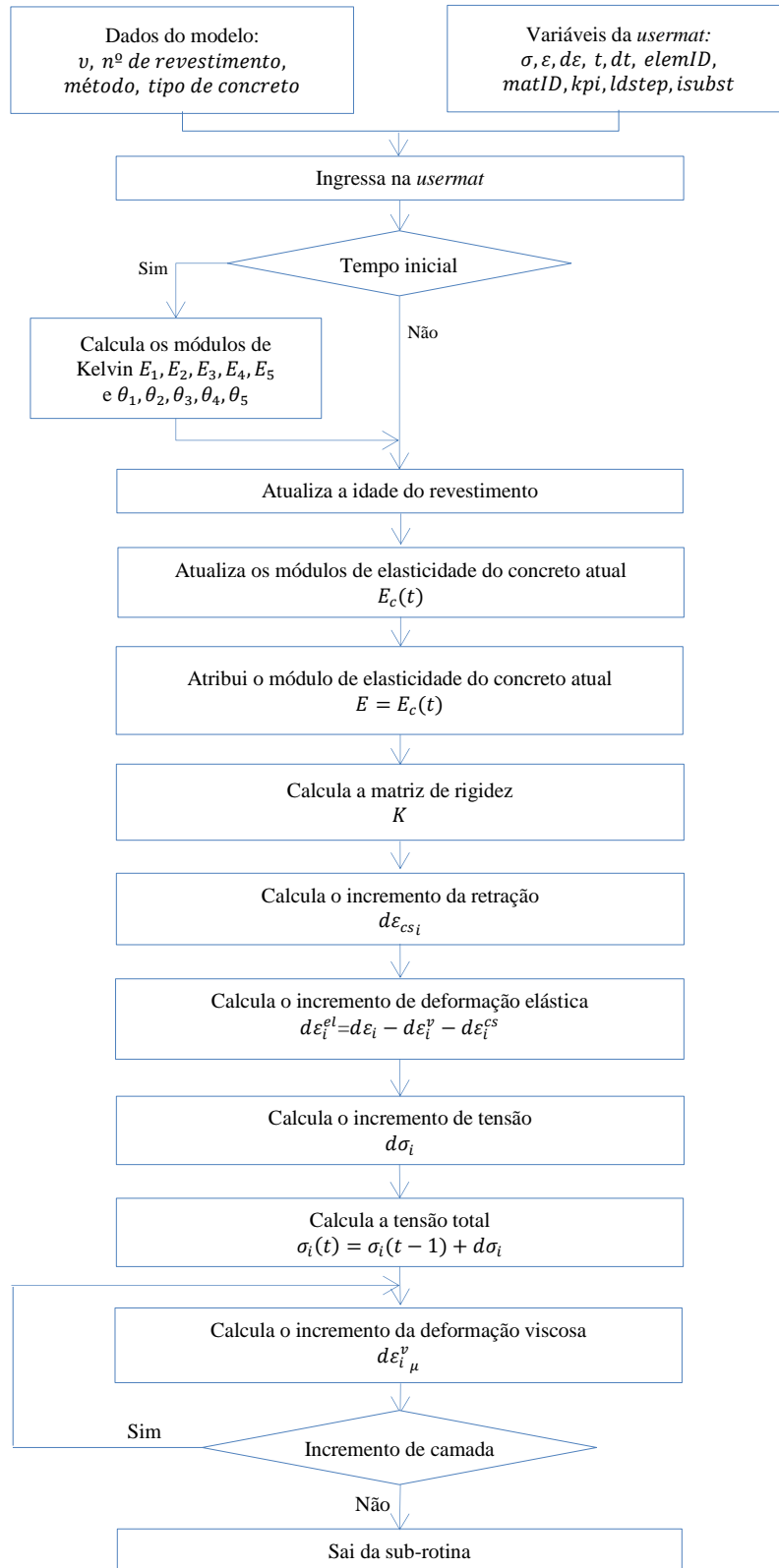


Figura 4: Fluxograma da *usermat* para o caso da Cadeia de Kelvin

5. ANÁLISE NUMÉRICA DE TÚNEIS UTILIZANDO AS CADEIAS DE MAXWELL E DE KELVIN

No projeto de obras subterrâneas os métodos numéricos, em engenharia civil, permitem a análise de estruturas complexas.

Modelos constitutivos são utilizados para formular o comportamento dos diferentes materiais (maciço-revestimento).

As tensões e deformações do suporte de um túnel dependem principalmente do método construtivo: método de escavação, tipo e espessura do revestimento, distância entre o revestimento e a face de escavação. Um modelo computacional tridimensional é necessário para analisar estas condições e as exigências de uma determinada obra subterrânea [7].

Neste capítulo, apresenta-se a simulação do processo de construção de um túnel e colocação do revestimento através do programa ANSYS. Combina-se o comportamento viscoplástico do maciço e o comportamento viscoelástico do concreto no revestimento do túnel.

5.1 Modelo no programa ANSYS

A simulação consiste em 37 escavações de um túnel de seção transversal circular, com $R=1$ m, em um maciço homogêneo, com uma distância de colocação do revestimento $d_0=2/3R$ e um passo de escavação $p=1/3R$, que deixa a face do túnel plana e transversal ao eixo longitudinal. A velocidade de escavação foi de 10 m/dia correspondente a uma tuneladora. Foi utilizado um passo a mais, para simular a estabilização ao longo do tempo. Então tem uma curva que corresponde ao final da construção do túnel e uma curva de estabilização que corresponde a um tempo muito grande depois do final da construção do túnel, que representa a situação em um tempo infinito.

Este túnel é profundo o suficiente, com relação ao seu raio, para considerar tensões geostáticas hidrostáticas na profundidade do maciço.

O sistema de suporte consiste em um revestimento de concreto de espessura $e=R/10$ constante.

Em função da simetria, foi discretizado apenas um quarto do total do modelo. As medidas do modelo são: 30 m no eixo longitudinal Z do túnel, 20 m nos eixos X e Y.

Foi utilizado o elemento SOLID186 para uma malha com mapeamento radial, exceto no maciço a ser escavado, que a malha foi gerada livremente. A malha está constituída por 7504 elementos e 34344 nós, como mostra a Figura 5.

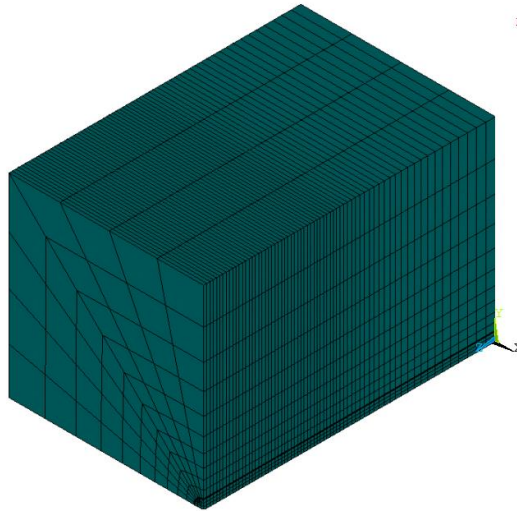


Figura 5: Malha do modelo 3D.

Utiliza-se para o maciço, um material não linear, viscoplástico, com lei de comportamento em plasticidade perfeita de Mises. O programa ANSYS utiliza a formulação de Perzyna conforme à equação (18):

$$\hat{\varepsilon}_{pl} = \gamma \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} - 1 \right)^{1/m} \quad (18)$$

Onde σ é a tensão, $\hat{\varepsilon}_{pl}$ é a taxa de deformação equivalente, m é o parâmetro relacionado à taxa de deformação do material, γ é o parâmetro relacionado à viscosidade do material e σ_o é a tensão de escoamento uniaxial. Os parâmetros do maciço viscoplástico e do concreto viscoelástico estão resumidos na Tabela 1.

Parâmetro	Solo	Parâmetros	Concreto
E	1000 MPa	ν	0,2
ν	0,498	f_{cm28}	4 kN/cm ²
P_∞	5 MPa	RH	65 %
γ	0,0000001 s ⁻¹	h (espessura fictícia)	200 mm
m	1	Temperatura	20 °C
σ_0	3 MPa		

Tabela 1: Propriedades do concreto e do maciço.

No programa ANSYS, o método de ativação/desativação, corresponde ao comando “Birth and Death”. O elemento é desativado multiplicando a sua rigidez por um severo fator de redução e tirando a sua massa da matriz global. As cargas e outros efeitos dos elementos desativados também são zerados. Da mesma forma, quando os elementos são “nascidos”, eles não são realmente adicionados ao modelo; mas são simplesmente reativados [8].

5.2 Descrição do processo no ANSYS

É utilizado o programa ANSYS na sua versão *Mechanical APDL 14.5*.

A entrada de dados é feita por um arquivo “.txt” que o ANSYS lê como arquivo de entrada.

A simulação consta de vários passos: cada escavação corresponde a um passo de carga (“step”). Primeiramente é criado o modelo completo, com o material 1 correspondente ao maciço viscoplástico. É configurada a malha do modelo e são colocadas as condições iniciais (tensão inicial do maciço) e de contorno (apoios e pressão nas faces). O primeiro passo é resolvido e corresponde ao equilíbrio, onde os deslocamentos são iguais a zero em todos os pontos da malha.

No passo seguinte é feita a primeira escavação, de 1 metro de comprimento (144 elementos), desativando estes elementos. Nos passos seguintes continuam as escavações (48 elementos) e colocação de revestimento (16 elementos), ativando estes elementos.

Ao ativar os elementos de concreto, eles são trocados para um novo material, no qual a sua idade é controlada segundo o tempo em que é ativado o elemento. Assim por diante até alcançar o comprimento desejado do túnel.

Ao alcançar o comprimento desejado, os passos têm como objetivo acabar de preencher com revestimento o túnel completo, porém não continuam as escavações. Depois, o túnel se deforma ao longo do tempo tendendo à estabilização.

Estas análises são quasi-estáticas e o programa utiliza o método numérico de Newton Raphson.

5.3 Resultados

Para simplificar a nomenclatura de cada caso, vão ser utilizadas as seguintes abreviaturas: os casos resolvidos com formulação do modelo Kelvin terão o código KE e com o Maxwell o código MA, seguido do sinal “-“ e logo a letra J ou M segundo seja concreto projetado ou pré-moldado.

No gráfico da Figura 6 apresentam-se as convergências de todos os casos de modo a comparar as formulações de Maxwell e Kelvin, os casos de concreto projetado e pré-moldado e os tempos ao final da escavação e depois de 5 anos.

Devido ao comportamento viscoelástico do concreto e o comportamento viscoplástico do maciço pode-se observar que a deformação radial do túnel continua ao longo do tempo, aumentando cada vez em menor proporção, tendendo à estabilização. Pelas hipóteses do modelo implementado neste estudo, o concreto não rompe devido à configuração viscoelástica do material. Ele continua se deformando ao longo de tempo, cada vez com um incremento de deformação menor.

Nas primeiras idades as deformações no concreto são importantes. Note-se que nas curvas da construção, comparando a face do túnel e a uma seção longe da face, apresenta-se uma diferença na convergência alcançada. Isso acontece devido a que nesse instante, perto da face, encontram-se os elementos de revestimento com idades menores, enquanto que no final do eixo encontram-se os elementos de revestimento que foram colocados no começo da construção.

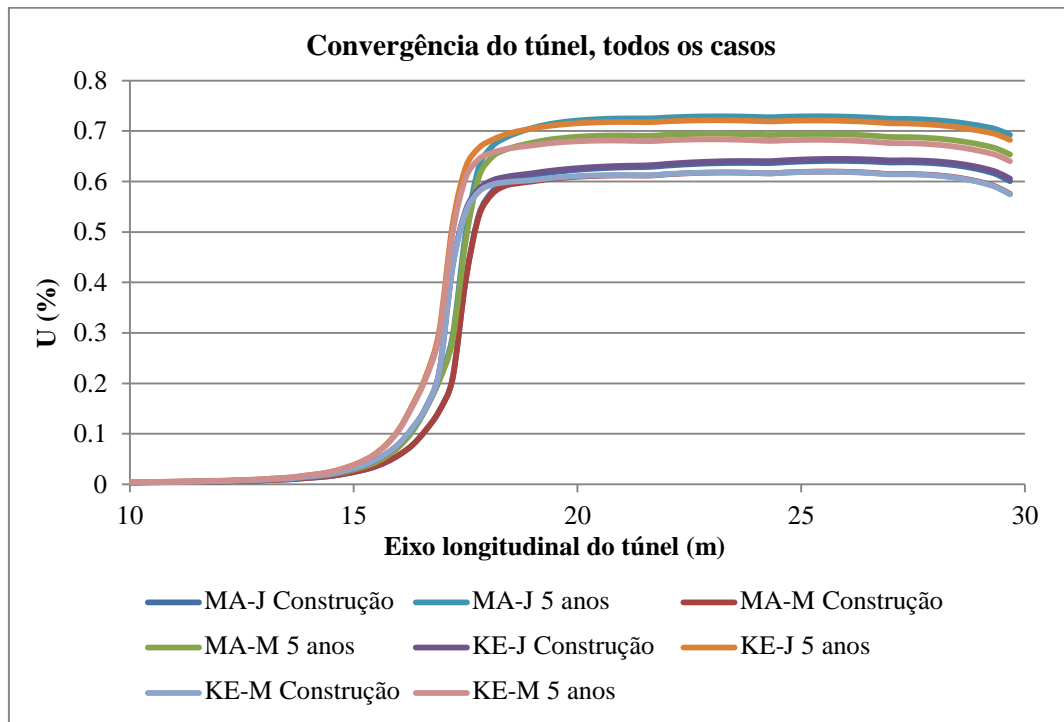


Figura 6: Convergência em todos os casos depois da construção e aos 5 anos.

As curvas no final da construção apresentam uma coincidência satisfatória entre métodos correspondentes. Depois dos 5 anos é possível observar que o caso de Maxwell projetado se deforma mais que os outros.

Em geral, os casos de Maxwell deformam mais que os correspondentes aos de Kelvin.

Para avaliar o comportamento ao longo do tempo em um ponto do revestimento, foi estudado um nó. Foi escolhido o nó com as coordenadas x,y,z do ponto no modelo, em cm: -70.71; 70.71; 2883.33, que corresponde a um elemento do revestimento número 4. Foi escolhido um nó um pouco afastado da face limite do modelo, para que não sofresse efeito das condições de contorno. Este nó está indicado em uma seção transversal, na Figura 7 a).

Os 4 casos podem ser vistos na Figura 7 b). Como já foi observado antes, o nó se desloca mais nos casos resolvidos com Maxwell. E as curvas do concreto pré-moldado sempre estão embaixo das curvas do concreto projetado, devido ao fato que o concreto pré-moldado é colocado quando o concreto já tem uma rigidez maior que no caso do concreto projetado.

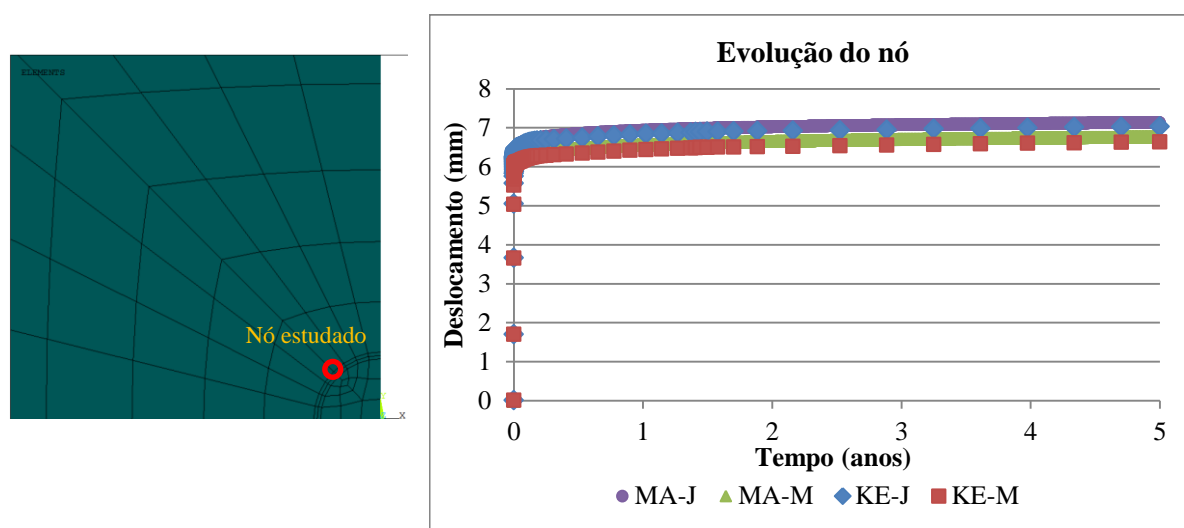


Figura 7: a) Localização do nó; b) Evolução do nó ao longo do tempo.

5.4 Comparação entre os modelos de Kelvin e de Maxwell

Desacoplando o efeito instantâneo de envelhecimento, é possível descrever o comportamento diferido com o modelo da cadeia de Kelvin utilizando propriedades E_μ e η_μ independentes do tempo. Este fato representa uma considerável simplificação. Assim, as deformações viscosas totais são calculadas independentemente dos passos anteriores e convergem sem problemas mesmo mudando o tamanho dos passos de tempo. No modelo de Maxwell as deformações viscosas totais são determinadas com uma formulação explícita, muito instável, e que é muito sensível às mudanças do tamanho dos passos de tempo. Os cálculos com o modelo de Maxwell foram feitos para um passo de tempo de um dia, enquanto que com o modelo de Kelvin o passo de tempo foi crescente, avançando muito mais rápido. O processo com o modelo de Kelvin demorou, nesta análise, em torno de 35 minutos e para o caso do modelo de Maxwell umas 7 horas (Computador Intel i7-4770K 3.50GHz com uma memória RAM de 8 Gb).

5.5 Comparação entre os resultados do concreto pré-moldado e concreto projetado

O concreto projetado e o pré-moldado são diferenciados pela idade. Supõe-se que o concreto pré-moldado é colocado com 28 dias de idade, enquanto o concreto projetado começa atuar com a idade da rigidez mínima correspondente a 2,8 dias. Isto é formulado por meio de um parâmetro escolhido no arquivo *input* do ANSYS que indica se o concreto vai ser considerado projetado ou pré-moldado. Este parâmetro e o número do revestimento ingressam na sub-rotina como dados do material. A idade de cada elemento de concreto é calculada na *usermat* com os dados próprios do material e o tempo geral que ingressa como variável de entrada (Figura 3 e Figura 4).

Na Tabela 2 mostra-se que a convergência aos 5 anos é maior em 12%, 10%, 14%, 12% para os casos KE-J, KE-M, MA-J, MA-M, respectivamente, em relação à convergência no instante

da construção.

Também, na Tabela 2 mostra-se que no instante do fim da construção, a relação entre a convergência do concreto projetado e pré-moldado é de 4% para o método de Kelvin e de 3% para o método de Maxwell. Aos 5 anos, a diferença na convergência do concreto projetado e pré-moldado é de 6% para o método de Kelvin e de 5% para o método de Maxwell.

	$U_{construção}$	$U_{5\text{ anos}}$	Relação
KE-J	0.64%	0.72%	12%
KE-M	0.62%	0.68%	10%
Relação	4%	6%	

	$U_{construção}$	$U_{5\text{ anos}}$	Relação
MA-J	0.64%	0.73%	14%
MA-M	0.62%	0.69%	12%
Relação	3%	5%	

Tabela 2: Relações de resultados para cada método e instante analisados.

6. REPRESENTAÇÃO DO TÚNEL KIELDER

Compara-se a convergência do túnel experimental Kielder e o modelo resolvido no ANSYS. Ward [9] descreve a história e o processo de construção do túnel experimental e apresenta os resultados correspondentes.

O túnel experimental Kielder, com 3,3 m de diâmetro, foi construído na Inglaterra em 1974 e fechado em 1979. Para comparar o comportamento de diferentes sistemas de suporte, sete diferentes suportes foram utilizados no trecho do túnel em argilito e dois métodos de escavação foram utilizados, como se mostra na Figura 8. Cada trecho foi de 11 m de comprimento.

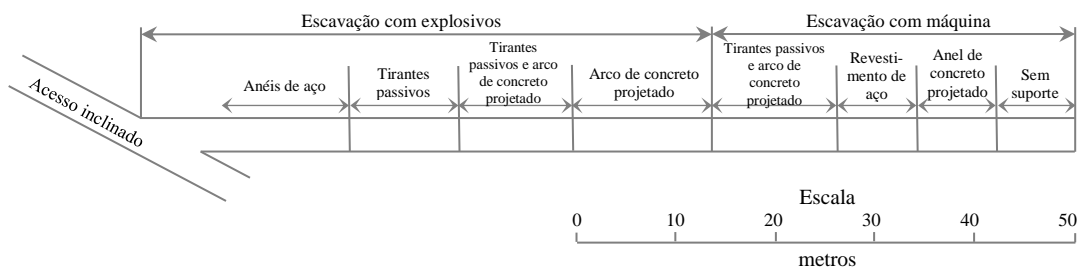


Figura 8: Trechos do túnel experimental Kielder. Adaptação de Freeman [10].

A instrumentação foi colocada a 30 cm acima do revestimento, na parte central de cada trecho para evitar efeitos de extremidade. Os instrumentos mediram os deslocamentos da rocha ao longo de 5 anos.

Nesta simulação, é utilizado o modelo de Kelvin para representar o trecho correspondente a anel de concreto projetado. Os parâmetros físicos e geométricos, utilizados na simulação, estão baseados nos trabalhos de Ward [9] e Freeman [10]. No modelo, são utilizados um

concreto viscoelástico e um maciço viscoplástico com as características apresentadas na Tabela 3:

Parâmetro	Solo	Parâmetros	Concreto
E	1200 MPa	ν	0,2
ν	0,3	f_{cm28}	4 kN/cm ²
P_{∞}	2,7 MPa	RH	80 %
γ	0,0000001 s ⁻¹	h (espessura fictícia)	200 mm
m	1	Temperatura	28 °C
σ_0	0,48 MPa		

Tabela 3: Propriedades do maciço e do concreto no túnel Kielder.

A simulação segue o mesmo esquema do capítulo 5, com as seguintes diferenças: o raio do túnel é $R=1,65$ m e a espessura do revestimento é de $e=0,143$ m. O modelo foi reduzido e a malha foi readaptada ao passo de escavação. O modelo ficou com 3904 elementos hexaédricos e 16599 nós.

O instrumento de medição foi colocado a 30 cm do revestimento, no meio do trecho do túnel experimental. Assim, na Figura 9, compara-se a curva da instrumentação com a evolução do deslocamento de um nó do modelo. Este nó do modelo está localizado no meio do trecho longitudinal do túnel e a 47 cm do revestimento.

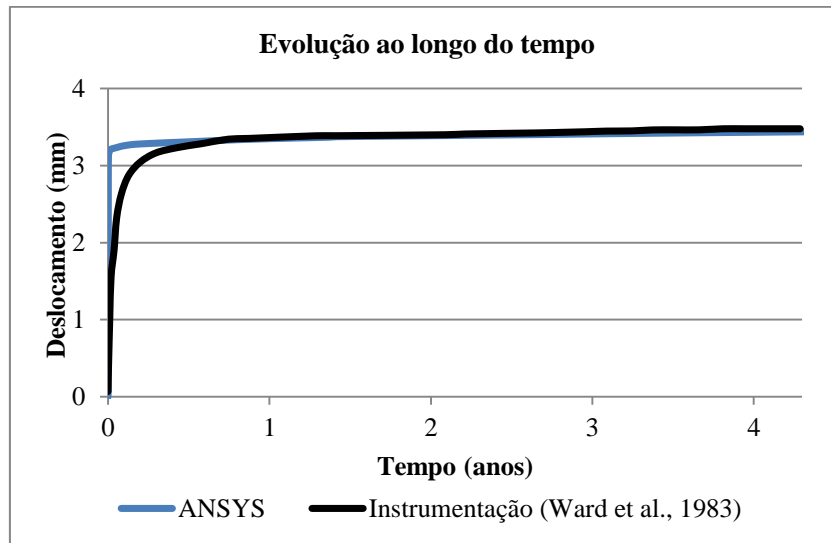


Figura 9: Comparação dos resultados ao longo do tempo.

O gráfico da Figura 9 mostra que o resultado, a longo prazo, está muito próximo das medições no local. A diferença a curto prazo pode-se dever aos parâmetros desconhecidos do concreto e também aos da construção e maciço relacionados ao tempo, que não estão especificados na bibliografia.

7. CONCLUSÕES

O programa ANSYS demonstrou ser uma ferramenta útil na simulação de escavações de um túnel e colocação do revestimento por meio do comando ativação/desativação.

Os modelos de Maxwell e de Kelvin [1], foram testados comparando com a formulação do Código Modelo *fib* 2010 [3]. Assim, foi demonstrado que os métodos de Kelvin e de Maxwell podem representar o comportamento do concreto viscoelástico.

O modelo de Kelvin ao considerar propriedades E_μ e η_μ independentes do tempo e calcular o efeito de envelhecimento do concreto em forma independente, computacionalmente, é mais conveniente e econômico. O método da cadeia de Kelvin não apresenta problemas de convergência, enquanto que o método da cadeia de Maxwell é sensivelmente instável devido a sua formulação explícita e atualização dos parâmetros. Além disso, o processo na formulação de Maxwell é mais extenso. Pelas causas citadas, o tempo total de cálculo é maior no método de Maxwell em relação ao método de Kelvin.

No caso do túnel com revestimento viscoelástico foram apresentados dois tipos de concreto: o concreto projetado e o concreto pré-moldado. Eles são diferenciados nas suas idades e nos correspondentes módulos de elasticidade no instante da colocação do revestimento. Para um mesmo método, estes dois revestimentos apresentaram pouca diferença, da ordem de 3 a 6%, na convergência nos instantes analisados. A convergência obtida ao longo do tempo varia entre 10 e 14% comparando o instante do fim da construção e aos 5 anos, para os diferentes métodos utilizados. A escolha de um destes revestimentos depende do tipo de túnel revestido e do maciço circundante.

Finalmente tudo o que foi feito anteriormente é utilizado para representar um trecho revestido em concreto projetado de um túnel real, o túnel Kielder. Neste caso, para representar o revestimento do túnel foi utilizado o método de Kelvin, pelas vantagens de convergência e tempo de cálculo. A convergência do túnel aos 5 anos no programa ANSYS foi comparada com os resultados disponíveis da instrumentação apresentando uma boa concordância.

A relevância da simulação de um túnel em um programa de elementos finitos está em tornar mais fácil o trabalho de projeto, permitindo a escolha da configuração mais vantajosa em termos de projeto e construção. O programa ANSYS em elementos finitos permite obter uma ampla variedade de resultados numéricos, bem como as diversas opções visuais de pós-processamento. Isto tem um papel importante na análise de um projeto.

O comportamento do revestimento em concreto projetado e concreto pré-moldado depende do tempo. A incorporação dos modelos viscoelásticos por meio de sub-rotinas no programa

ANSYS permite representar com maior precisão o comportamento a longo prazo do concreto, especialmente para estudar o revestimento de um túnel onde é importante o seu comportamento diferido.

Por estas razões tais técnicas são cada vez mais atrativas na representação de modelos numéricos para obras de arte (o túnel neste caso), aproveitando assim os recursos de pré e pós-processamento de um programa comercial. Por outro lado a utilização de um programa comercial, como o ANSYS, permite incorporar modelos adicionais de acordo com o caso, desenvolvidos para análises de determinadas situações, diferentes das opções originalmente oferecidas pelo programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Bazant e S. Prasannan, “Solidification theory for aging creep,” *Cement and Concrete Research*, vol. 18, pp. 923-932, 1988.
- [2] O. Zienkiewicz e I. Corneau, “Visco-Plasticity and Creep in Elastic Solids - A Unified Numerical Solution Approach,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. VIII, pp. 821-845, 1974.
- [3] Fédération Internationale du Béton, “Fib Model Code 2010. Final Draft,” vol. 1, n.º Bulletin 65, p. 350, 2012.
- [4] G. J. Creus, *Viscoelasticity - Basic Theory and Applications to Concrete Structures*, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 1986, p. 169.
- [5] Z. P. Bazant, *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*, John Wiley & Sons, 1988.
- [6] G. N. Pande, D. R. J. Owen e O. C. Zienkiewicz, “Overlay models in time-dependent non-linear material analysis,” *Computers and Structures*, vol. 7, n.º 3, pp. 435-443, 1977.
- [7] AFTES, “AFTES Recommendations,” em *Design of Sprayed Concrete for Underground Support*, www.aftes.asso.fr, Ed., Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 2000, p. 36.
- [8] ANSYS, “Mechanical APDL Structural Analysis Guide,” ANSYS, Inc., Versão 14.5, 2012.
- [9] W. H. Ward, P. Tedd e N. S. M. Berry, “The Kielder experimental tunnel: final results,” *Géotechnique*, vol. 33, n.º 3, pp. 275-291, 1983.
- [10] B. T J Freeman, “The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder Experimental tunnel,” *Tunnels & Tunneling*, pp. 37-40, June 1978.