

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise do Efeito do Tempo nas Solicitações de Fundações de Estruturas Tridimensionais Discretizadas em Elementos Finitos

Mariana Larissa Antunes da Costa

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, mariana.antunes@engenharia.ufjf.br

Juliane Crisitna Gonçalves

Professora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, juliane.goncalves@ufjf.edu.br

RESUMO: No presente artigo, são apresentadas solicitações ao longo do tempo, obtidas a partir de modelagem de estruturas tridimensionais de diferentes rigidezes em elementos finitos. Estudam-se oito situações, quais sejam: (i) estrutura com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência; (ii) estrutura com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência e retração; (iii) estrutura com apoios em molas ($k = 100$ kN/m) e material da estrutura sujeito à fluência; (iv) estrutura com apoios em molas ($k = 100$ kN/m) e material da estrutura sujeito à fluência e retração (v) estrutura com apoios em molas ($k = 1000$ kN/m) e material da estrutura sujeito à fluência (vi) estrutura com apoios em molas ($k = 1000$ kN/m) e material da estrutura sujeito à fluência e retração (vii) estrutura com apoios viscoelásticos e material da estrutura sujeito à fluência e, finalmente, (viii) estrutura com apoios viscoelásticos e material da estrutura sujeito à fluência e retração. Verificou-se, para 50% dos pilares, uma redistribuição de solicitações com valores tendendo ao longo do tempo (modelo viscoelástico) aos valores do modelo elástico. Constatou-se, ainda, que o efeito da fluência do concreto foi maior que o da retração.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito do Tempo, Solicitações de Fundações, Estruturas Tridimensionais, Elementos Finitos.

ABSTRACT: This study presents loads over time, obtained from finite element modeling of three-dimensional structures of different stiffness. Eight situations are studied, as follows: (i) structure with rigid supports and material subjected to creep; (ii) structure with rigid supports and material subjected to creep and shrinkage; (iii) structure with spring supports ($k = 100$ kN/m) and material subjected to creep; (iv) structure with spring supports ($k = 100$ kN/m) and material subjected to creep and shrinkage; (v) structure with spring supports ($k = 1000$ kN/m) and material subjected to creep; (vi) structure with spring supports ($k = 1000$ kN/m) and material subjected to creep and shrinkage; (vii) structure with viscoelastic supports and material subjected to creep and finally; (viii) structure with viscoelastic supports and material subjected to creep and shrinkage. There was load redistribution with values bending over time (viscoelastic model) to the values of the elastic model for 50% of the columns. It was also found that the effect of concrete creep was significantly greater than the shrinkage one.

KEYWORDS: Time Effect, Loads on Foundations, Three-dimensional Structures, Finite Elements.

1 Introdução

Ultimamente, com a disponibilidade de programas de cálculo de engenharia bastante sofisticados, cada vez mais projetos têm sido desenvolvidos considerando a interação entre a estrutura e fundações. Porém, essa interação é realizada admitindo-se apenas a parcela imediata das deformações e deslocamentos. Não é levada em conta, por exemplo, a fluência do material da estrutura.

O fenômeno de fluência ocorre de forma mais pronunciada nas estruturas de concreto armado que, por exemplo, nas estruturas metálicas e, de acordo com Santa Maria *et al.* (1999), a interação entre os comportamentos da estrutura e da fundação ao longo do tempo pode resultar em esforços com sinal e intensidade não previstos em projetos elaborados a partir de uma análise elástica. Dessa maneira, ressalta-se a importância da realização de estudos comparativos entre análises elástica e viscoelástica, esta última



considerando a parcela da deformação que é dependente do tempo, seja referente ao material da estrutura, seja referente ao elemento de fundação.

Bjerrum (1963) já ressaltava que o fator tempo é muito importante em recalques distorcionais e que o critério de recalque é diferente para edificações em areia e em argila. Uma edificação é capaz de resistir, sem danos, a recalques distorcionais maiores ao longo do tempo.

Neste artigo, apresenta-se uma comparação entre solicitações ao longo do tempo obtidas a partir de modelagem estrutural em elementos finitos de estruturas tridimensionais de diferentes rigidezes. Este estudo tem como objetivo fornecer elementos para as interpretações de resultados de estruturas mais sofisticadas como, por exemplo, edifícios de múltiplos andares de concreto armado com a consideração da interação solo-estrutura ao longo do tempo.

2 Modelagem da Estrutura

Para o desenvolvimento deste estudo, utiliza-se o programa SAP2000 (versão 15), o qual possibilita análises elástica e viscoelástica. Essa versão 15 do programa SAP2000 traz a possibilidade de se considerar a fluência e retração de materiais como, por exemplo, o concreto com base no CEB-FIP (1990).

Para a modelagem das estruturas tridimensionais, as vigas e os pilares foram discretizados usando-se elementos de barra. Para as lajes foram usados elementos de placa. Foi considerado o peso específico do concreto igual a 24 kN/m^3 e adotado um módulo de elasticidade inicial, aos 28 dias, de 24 GPa . As estruturas estão submetidas ao peso próprio.

Para as fundações foram admitidas as situações de apoios indeslocáveis, apoios em mola ($k = 100 \text{ kN/m}$ e $k = 1000 \text{ kN/m}$) e de apoios viscoelásticos representados pela associação em série do modelo Hookeano com o modelo Kelvin. Os parâmetros de coeficiente de amortecimento (η) do modelo foram admitidos com o valor de 10000000 kNdia/m , com base em Vyalov (1986). A Figura 1(a) mostra o modelo tridimensional em elementos finitos e 1(b) o modelo reológico adotado para os apoios viscoelásticos.

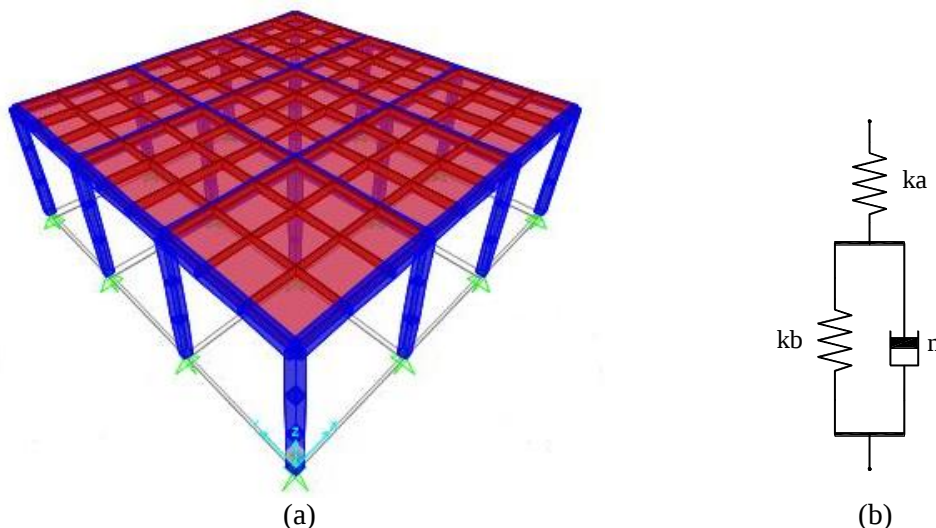


Figura 1. (a) Modelo tridimensional da estrutura em elementos finitos com apoios indeslocáveis e (b) Modelo reológico adotado para os apoios.

A estrutura tridimensional possui 16 pilares. Todos os vãos são de 3 metros. Analisam-se duas estruturas de diferentes rigidezes: estrutura tridimensional – rigidez 1 e estrutura tridimensional – rigidez 2. A estrutura tridimensional – rigidez 1 possui as seções transversais das vigas e pilares iguais $20 \times 20 \text{ cm}$ e lajes com altura de 20 cm . A estrutura tridimensional – rigidez 2 possui as seções transversais das vigas e pilares iguais a $40 \times 40 \text{ cm}$ e lajes com altura de 40 cm .

3 Esforços Normais Obtidos nos Pilares



São estudadas oito situações para as solicitações obtidas a partir da modelagem estrutural em elementos finitos das duas estruturas tridimensionais (rigidez 1 e rigidez 2), quais sejam: (i) estrutura com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência; (ii) estrutura com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência e retração; (iii) estrutura com apoios em mola ($k = 100 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência; (iv) estrutura com apoios em mola ($k = 100 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência e retração; (v) estrutura com apoios em mola ($k = 1000 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência. (vi) estrutura com apoios em mola ($k = 1000 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência e retração. (vii) estrutura com apoios viscoelásticos e material da estrutura sujeito à fluência e, finalmente, (viii) estrutura com apoios viscoelásticos e material da estrutura sujeito à fluência e retração.

As figuras 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, os esforços normais para os pilares de canto, pilares periféricos e pilares centrais para a estrutura tridimensional – rigidez 1.

Os esforços normais foram normalizados em relação ao esforço normal no tempo igual a zero para a situação de apoios indeslocáveis e material da estrutura elástico através da expressão 1:

$$\nu = \frac{N(t)}{N_e(t)} \quad (1)$$

Sendo:

ν = Esforço normal normalizado.

$N(t)$ = Esforço normal no tempo t .

$N_e(t_0)$ = Esforço normal elástico no tempo t_0 .

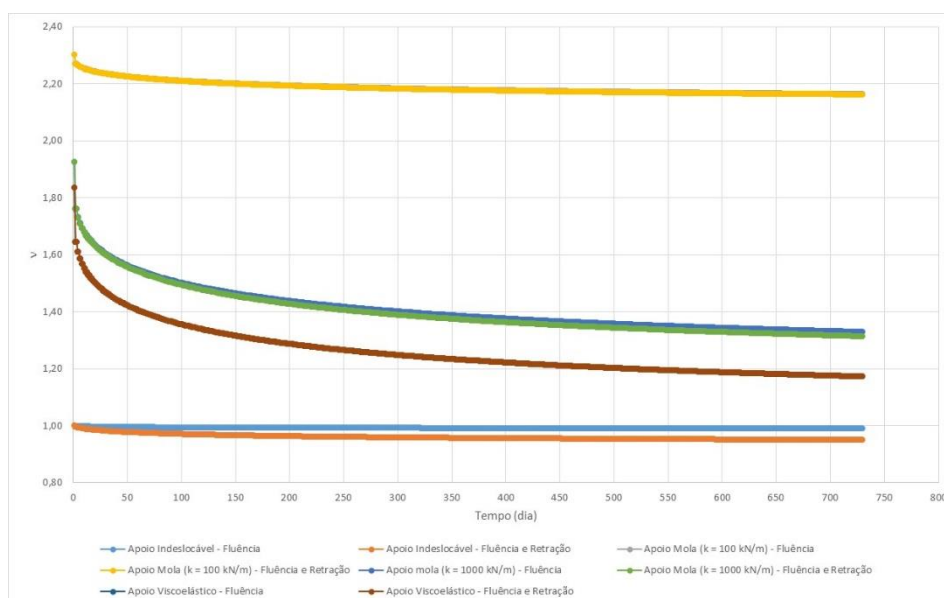


Figura 2. Esforço normal nos pilares de canto da estrutura tridimensional – rigidez 1 versus tempo.

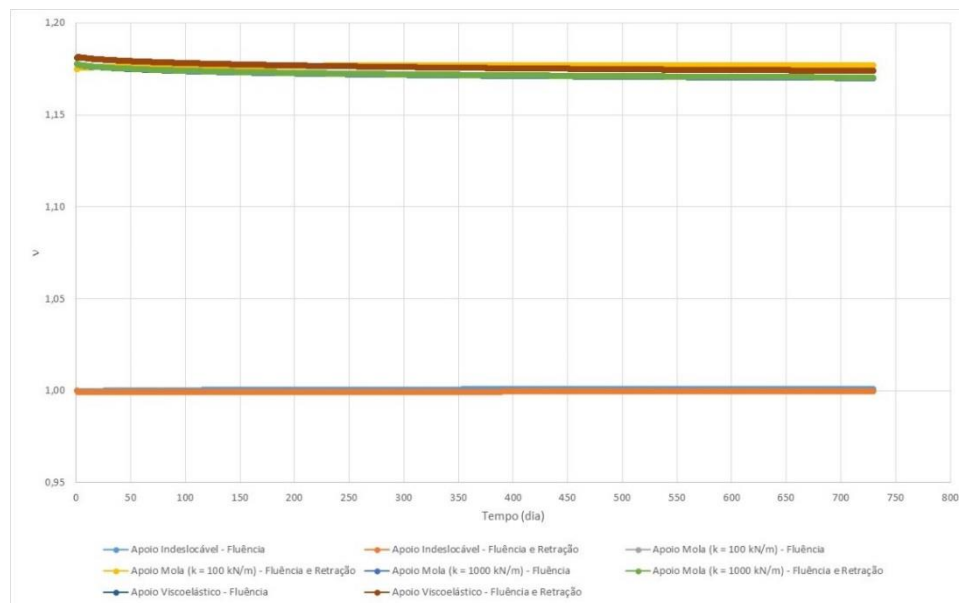


Figura 3. Esforço normal nos pilares periféricos da estrutura tridimensional – rigidez 1 versus tempo.

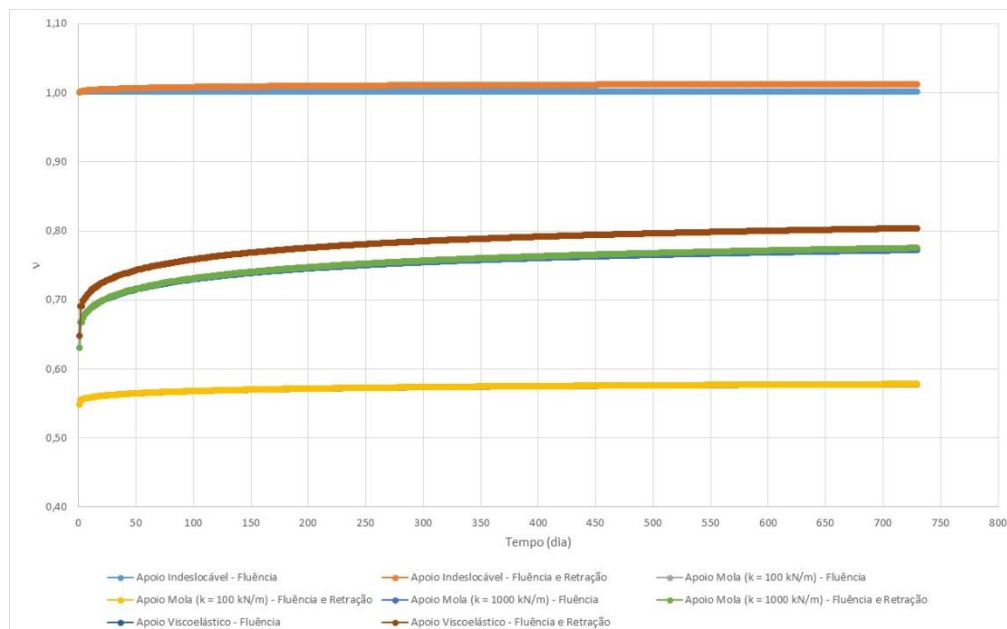


Figura 4. Esforço normal nos pilares centrais da estrutura tridimensional – rigidez 1 versus tempo.

A partir da Figura 2, observa-se, de um modo geral, que os pilares de canto absorvem solicitação, porém existe um decréscimo dessa ao longo do tempo. Constata-se que para a primeira situação – estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência – os pilares de canto apresentam o esforço normal constante ao longo do tempo. O esforço normal normalizado em relação ao esforço normal no tempo igual a zero apresenta resultado igual a um. De fato, segundo Carneiro (1978), o primeiro Teorema da Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade consiste em que os esforços internos (tensões ou esforços solicitantes nas seções) oriundos da ação das cargas não são modificados pela fluência. Em qualquer instante t os esforços internos são os que ocorreriam em um corpo com as mesmas características geométricas e vinculação e solicitados pelas mesmas cargas, mas constituídos de material elástico. Vale mencionar que os chamados teoremas de Correspondência aplicam-se às estruturas homogêneas, constituídas, portanto, de um único material; que apresentem fluência linear e desde que os tipos das condições de fronteira (condições de tensões ou condições de deslocamentos prescritos) não sejam alterados em cada região da fronteira, durante a história da estrutura.



Para a segunda situação – estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência e retração – nota-se que, conforme ilustrado na Figura 2, os pilares de canto apresentam um decréscimo do esforço normal ao longo do tempo. Para a terceira situação – estrutura tridimensional com apoios em mola ($k = 100 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência – percebe-se que os pilares de canto apresentam um decréscimo do esforço normal ao longo do tempo. O efeito da retração não aparece para a situação de apoios em mola com a rigidez da mola (k) igual a 100 kN/m . Para a quinta e sexta situações – estrutura tridimensional com apoios em mola ($k = 1000 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência e material da estrutura sujeito à fluência e retração – observam-se os esforços normais se aproximando da situação de apoios indeslocáveis, conforme esperado, uma vez que se tem um valor de coeficiente de rigidez da mola maior ($k = 1000 \text{ kN/m}$). Para a sétima e oitava situações – estrutura tridimensional com apoios viscoelásticos e material da estrutura sujeito à fluência e material da estrutura sujeito à fluência e retração – percebe-se que os valores de esforços normais também tendem aos valores do modelo elástico. Ressalta-se que a introdução da retração no material do pórtico espacial não alterou os resultados para a situação de apoios viscoelásticos.

Constata-se, a partir da Figura 3, que os pilares periféricos, de um modo geral, absorvem solicitações e essas tendem a se manter constantes ao longo do tempo. O efeito da retração não aparece para todas as situações. Verifica-se que para a primeira situação – estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência – os pilares periféricos apresentam o esforço normal constante ao longo do tempo. O esforço normal normalizado em relação ao esforço normal no tempo igual a zero apresenta resultado igual a um, ou seja, atendem o primeiro Teorema da Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade.

A partir da Figura 4, observa-se, de um modo geral, que os pilares centrais sofrem um alívio de solicitação, porém existe um acréscimo de solicitação ao longo do tempo. Constata-se que para a primeira situação – estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência – os pilares centrais apresentam o esforço normal constante ao longo do tempo. O primeiro Teorema da Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade é atendido.

Para a segunda situação – estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência e retração – nota-se que, conforme ilustrado na Figura 4, o efeito da retração quase não aparece. Para a terceira situação – estrutura tridimensional com apoios em mola ($k = 100 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência – percebe-se que os pilares centrais apresentam um acréscimo do esforço normal ao longo do tempo. O efeito da retração não aparece para a situação de apoios em mola com a rigidez da mola (k) igual a 100 kN/m . Para a quinta e sexta situações – estrutura tridimensional com apoios em mola ($k = 1000 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência e material do pórtico sujeito à fluência e retração – observam-se os esforços normais se aproximando da situação de apoios indeslocáveis, conforme esperado, uma vez que se tem um valor de coeficiente de rigidez da mola dez vezes maior que o da situação anterior ($k = 1000 \text{ kN/m}$). Para a sétima e oitava situações – estrutura tridimensional com apoios viscoelásticos e material da estrutura sujeito à fluência e material do pórtico sujeito à fluência e retração – percebe-se que os valores de esforços normais também tendem aos valores do modelo elástico. Salienta-se que a introdução da retração no material da estrutura não alterou os resultados para a situação de apoios viscoelásticos.

As figuras 5, 6 e 7 mostram, respectivamente, os esforços normais para os pilares de canto, pilares periféricos e pilares centrais para a estrutura tridimensional – rigidez 2.

Os esforços normais foram normalizados em relação ao esforço normal no tempo igual a zero para a situação de apoios indeslocáveis e material da estrutura tridimensional elástico também através da expressão 1.

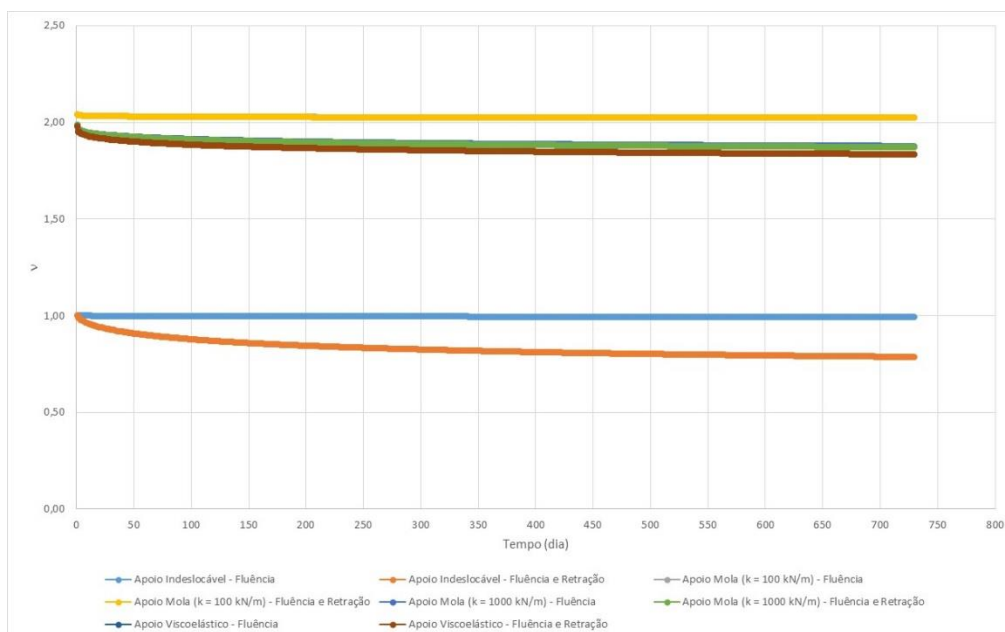


Figura 5. Esforço normal nos pilares de canto da estrutura tridimensional – rigidez 2 versus tempo.

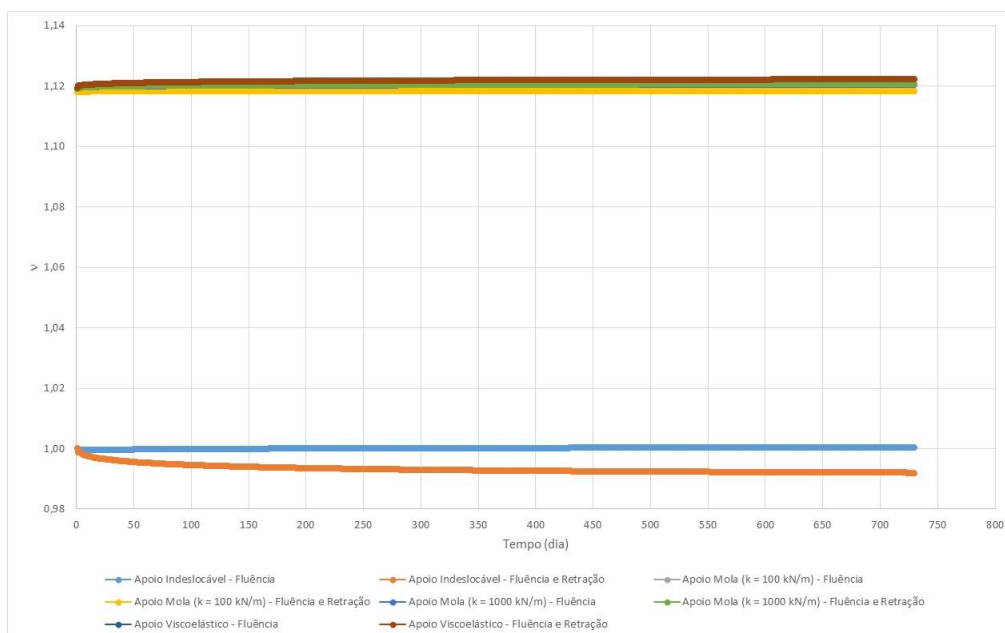


Figura 6. Esforço normal nos pilares periféricos da estrutura tridimensional – rigidez 2 versus tempo.

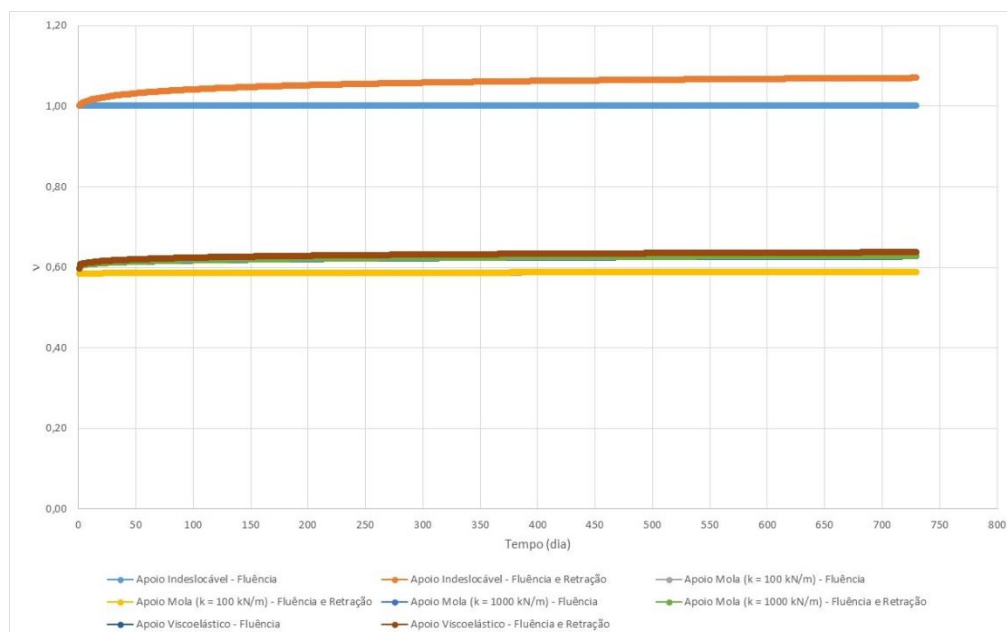


Figura 7. Esforço normal nos pilares centrais da estrutura tridimensional – rigidez 2 versus tempo.

A partir da Figura 5, observa-se que os pilares de canto da estrutura tridimensional – rigidez 2 apresentam o mesmo comportamento da estrutura tridimensional – rigidez 1. Ressalta-se que para a segunda situação – estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência e retração – os pilares de canto apresentam um decréscimo de aproximadamente 22% no tempo de 730 dias. Além disso, para a quinta e sexta situações – estrutura tridimensional com apoios em mola ($k = 1000 \text{ kN/m}$) e material da estrutura sujeito à fluência e material da estrutura sujeito à fluência e retração – observam-se os esforços normais se aproximando da situação de apoios indeslocáveis, conforme esperado. Comparando-se esses resultados com os mesmos da estrutura tridimensional – rigidez 1, percebe-se a influência da rigidez relativa estrutura-fundação nos valores de esforços normais ao longo do tempo.

A partir da Figura 6, constata-se que os pilares periféricos da estrutura tridimensional – rigidez 2 apresentam o mesmo comportamento da estrutura tridimensional – rigidez 1, ou seja, de um modo geral, absorvem solicitação e essa tende a se manter constante ao longo do tempo (a variação máxima não chega a 1% no tempo de 730 dias). Enfatiza-se que o primeiro Teorema da Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade é atendido.

A partir da Figura 7, observa-se, de um modo geral, que os pilares centrais sofrem um alívio de solicitação (tal alívio atinge até aproximadamente 41% no tempo de 730 dias para a situação de estrutura tridimensional com apoios em mola – $k = 100 \text{ kN/m}$ – e material da estrutura sujeito à fluência e material da estrutura sujeito à fluência e retração), porém existe um pequeno acréscimo de solicitação ao longo do tempo (a variação máxima desse acréscimo não chega a 7% no tempo de 730 dias para a situação de estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis e material da estrutura sujeito à fluência e retração). Verifica-se que o primeiro Teorema da Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade é atendido e, também, que o efeito da retração não aparece com exceção da situação de estrutura tridimensional com apoios indeslocáveis. Para a quinta e sexta situações – pórtico espacial com apoios em mola ($k = 1000 \text{ kN/m}$) e material do pórtico sujeito à fluência e material do pórtico sujeito à fluência e retração – observam-se os esforços normais se aproximando da situação de apoios indeslocáveis, conforme esperado. Para a sétima e oitava situações – pórtico espacial com apoios viscoelásticos e material do pórtico sujeito à fluência e material do pórtico sujeito à fluência e retração – percebe-se que os valores de esforços normais também tendem aos valores do modelo elástico.

A análise efetuada das estruturas (rigidez 1 e 2) mostrou, para 50% dos pilares, uma redistribuição de solicitações com valores tendendo ao longo do tempo (modelo viscoelástico) aos valores do modelo elástico. Porém, a variação de solicitações pode ser significativa. De fato, atingiu cerca de 83% (estrutura tridimensional – rigidez 2). A Tabela 1, a seguir, indica esses resultados – pilares selecionados com a cor cinza.



Tabela 1. Efeito da fluência sobre as solicitações nos pilares.

Pilar		Estrutura Tridimensional - Rigidez 1				Estrutura Tridimensional - Rigidez 2			
		Solicitação do Programa (kN)		Δ (%)		Solicitação do Programa (kN)		Δ (%)	
		Modelo Viscoelástico	Modelo Elástico			Modelo Viscoelástico	Modelo Elástico		
Canto	1	24	15	13	17	74	68	37	83
	7	24	15	13	17	74	68	37	83
	25	24	15	13	17	74	68	37	83
	31	24	15	13	17	74	68	37	83
Periférico	3	31	31	26	-	76	76	68	-
	5	31	31	26	-	76	76	68	-
	9	31	31	26	-	76	76	68	-
	15	31	31	26	-	76	76	68	-
	17	31	31	26	-	76	76	68	-
	23	31	31	26	-	76	76	68	-
	27	31	31	26	-	76	76	68	-
Central	11	38	47	58	20	78	83	131	36
	13	38	47	58	20	78	83	131	36
	19	38	47	58	20	78	83	131	36
	21	38	47	58	20	78	83	131	36
Σ		495	495	495	-	1216	1216	1216	-
Tempo (dia)		1	730	0		1	730	0	

4 Conclusões

Enumeram-se as seguintes conclusões:

(i) Os pilares de canto das estruturas tridimensionais (rigidez 1 e rigidez 2), de um modo geral, absorvem solicitações no tempo inicial (que representa a condição da interação solo-estrutura) e essas solicitações decrescem ao longo do tempo. (ii) Os pilares periféricos das estruturas tridimensionais (rigidez 1 e rigidez 2) absorvem solicitações no tempo inicial (que representa a condição da interação solo-estrutura) e essas solicitações se mantêm praticamente constantes ao longo do tempo. (iii) Os pilares centrais das estruturas tridimensionais (rigidez 1 e rigidez 2), de um modo geral, sofreram alívio de solicitações no tempo inicial e essas solicitações aumentam ao longo do tempo. (iv) A partir do aumento da rigidez da mola dos apoios de $k = 100 \text{ kN/m}$ para $k = 1000 \text{ kN/m}$ e, ainda, do aumento da rigidez da estrutura tridimensional, percebe-se a influência da rigidez relativa estrutura-fundação nos valores de esforços normais ao longo do tempo. (v) Quando a rigidez da estrutura tridimensional é aumentada, o efeito da fluência diminui significativamente. (vi) O efeito da retração foi praticamente imperceptível em todas as situações estudadas. (vii) A análise efetuada das estruturas (rigidez 1 e 2) mostrou, para 50% dos pilares, uma redistribuição de solicitações com valores tendendo ao longo do tempo (modelo viscoelástico) aos valores do modelo elástico. Porém, a variação de solicitações pode ser significativa. De fato, atingiu cerca de 83% (estrutura tridimensional – rigidez 2).

REFERÊNCIAS

- Bjerrum, L. (1963) Allowable Settlement of Structures. *Proceeding European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Weisbaden, v. II, pp. 135-137.
- Carneiro, F.L.L.B. (1978) Considerações sobre a Influência da Retração e Fluência do Concreto no Cálculo das Estruturas. Colóquio sobre Retração e Deformação Lenta do Concreto, IBRACON, São Paulo, pp. 1-23.
- Comite Euro-International Du Beton (1990) Ceb-Fip Model Code, Design Code, Thomas Telford.
- Santa Maria, P.E.L., Santa Maria, F.C.M. & Santos, A.B. (1999) Análise de Vigas Contínuas com Apoios Viscoelásticos e sua Aplicação a Problemas de Interação Solo-Estrutura. *Solos & Rochas*, v.22, nº 3, pp. 179-194.
- SAP 2000 (2015) CSI Analysis Reference Manual v.15.0. Computers and Structures Inc., California, USA, 415 p.
- Vyalov, S.S. (1986) *Rheological Fundamentals of Soil Mechanics*. 1st Edition, Elsevier Science, 564 p.