

Análise paramétrica da redistribuição de tensões em pilares-parede de pontes

PABLO J. L. E SILVA SANTOS - DOUT. - <https://orcid.org/0000-0002-4939-5184> (pablojuan.engenhariacivil@gmail.com);

PAULO C. DE R. MARTINS - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0002-9434-8950>;

RAMON S. Y. R. C. SILVA - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0003-2004-6236>;

CARLOS H. L. VIANA - DOUT. - <https://orcid.org/0000-0002-2576-8732>;

WILLIAM T. M. SILVA - PROF. DR. - <https://orcid.org/0000-0002-8806-0440> | UNB

RESUMO

EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E PROTENDIDO, O AUMENTO DAS DEFORMAÇÕES E A REDISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À RETRAÇÃO E A FLUÊNCIA PODEM SER BAS-TANTE SIGNIFICATIVOS E CERTOS PARÂMETROS DE PROJETO PODEM SER EXCEDIDOS DURANTE A VIDA ÚTIL DA ESTRUTURA. EM PILARES, PARTICULARMENTE, ESTE EFEITO É CRÍTICO EM RELAÇÃO AO ALCANCE DO LIMITE DE ESCOAMENTO PELO AÇO. ESTE TRABALHO TEM O OBJETIVO DE QUANTIFICAR O AUMENTO DAS TENSÕES DEVIDO AO INCREMENTO DO ÍNDICE DE RETANGULARIDADE EM DIFERENTES FAMÍLIAS DE PILARES-PAREDE, COM DIMENSÕES DE ORDEM DE GRANDEZA UTILIZADA EM PROJETOS DE PONTES, SOB AÇÃO DE CARGA CENTRADA DE 50% DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO DO CONCRETO (FCK) E CONSIDERANDO DIFERENTES TAXAS DE ARMAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS. ATUALMENTE, MÉTODOS NUMÉRICOS NA ANÁLISE, COMO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF), SÃO AMPLAMENTE UTILIZADOS E SE CONSTITUEM COMO FERRAMENTA AUXILIAR PARA PREVISÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS. PORÉM, ESTES POR SI SÓ NÃO SÃO CAPAZES DE REPRODUZIR FIELMENTE O COMPORTAMENTO DO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO, CONFORME LITERATURA EXPERIMENTAL A RESPEITO DO TEMA. ASSIM, PARA O CÁLCULO DOS EFEITOS DIFERIDOS, ESTE TRABALHO UTILIZOU AS FORMULAÇÕES DO MODEL CODE 2010 E PARA O CÁLCULO DA REDISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES FOI APLICADO O MÉTODO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE AJUSTADO, TORNANDO A ANÁLISE MAIS PRÁTICA. AO FINAL, EMPREGOU-SE A GEOMETRIA DOS PILARES-PAREDE DO TRECHO ESTAIADO DA PONTE JUSCELINO KUBITSCHKE, LOCALIZADA EM BRASÍLIA-DF, COMO PARÂMETRO PARA A QUANTIFICAÇÃO DA REDISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES. A PARTIR DOS RESULTADOS OBTIDOS, CONCLUIU-SE QUE O AUMENTO DE TENSÕES PRODUZIDO PELOS EFEITOS DIFERIDOS É SIGNIFICATIVO E PODE AUMENTAR EM ATÉ 212 MPa AS TENSÕES NO AÇO, REPRESENTANDO UM RISCO DE

FLAMBAGEM EM PILARES SOB EFEITO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.

PALAVRAS-CHAVE: RETRAÇÃO, FLUÊNCIA, MÉTODO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE AJUSTADO.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos diferidos decorrem da variação do tempo ocasionando mudança gradual na forma em que ocorrem. Dentre eles, podem-se destacar a fluência e a retração. A fluência é um fenômeno caracterizado pela variação temporal da deformação relativa ao concreto quando submetido à tensão constante. Já, na retração, ocorre variação de deformação ao longo do tempo sem aplicação de carga devido à saída de água pelos poros durante o processo endurecimento do concreto. Favre *et al.* (1999) argumentam que os efeitos diferidos provavelmente é o assunto mais difícil e menos compreendido dentre os que dizem respeito ao projeto de estruturas de concreto.

Destaca-se que esses efeitos são propriedades típicas do concreto e ausentes em outros materiais, como, por exemplo, o aço. Al-Manasseer e Lam (2005) afirmam que o comportamento ao longo do tempo do concreto, devido às propriedades de fluência e retração, tem considerável influência no desempenho de estruturas de concreto, podendo causar deformação excessivas e redistribuição de tensões.

Trost (1991) explica que a redistribuição de tensões internas sob cargas externas permanentes e forças de protensão é causada pela quantidade e distribuição de armadura na seção transversal – independente se a armadura é protendida ou não. Trost (1991) ainda menciona que essas tensões dependentes do tempo no aço e no

concreto podem ser facilmente derivadas com base no equilíbrio e compatibilidade das deformações em uma seção.

De maneira geral, a fluência e a retração do concreto se produzem simultaneamente. Assim, para efeito de cálculo, considera-se como isoladas e adiciona-se uma à outra posteriormente.

Portanto, tem-se que a concepção do efeito final da deformação relativa total é dada pela soma da deformação relativa instantânea, da deformação relativa livre e da rearmadura relativa livre devida às alterações das tensões provocadas pelos diferentes entraves às deformações livres.

No caso de estruturas de pilares com seções transversais de grandes dimensões, sobretudo pilares-parede de pontes, tem-se a preocupação de entender o efeito da redistribuição das tensões entre o concreto e o aço, pois, quando há tensões elevadas, pode-se ocorrer ruptura em uma determinada seção em virtude dessa transferência de esforços.

Favre *et al.* (1999) alertam para o fato de a redistribuição de forças internas resultar em mudanças nos sinais dos momentos, principalmente nas proximidades das zonas de momentos nulos. Ressalta-se que, em uma seção tensionada por um momento positivo antes da redistribuição e armada adequadamente pode, dependendo do caso, encontrar-se tensionada por um momento negativo e sua armadura superior pode ser prejudicada (fissura excessiva, tensões inadmissíveis nos aços) e durabilidade, e isso apesar de os momentos serem baixos nestas áreas.

Para analisar o efeito da redistribuição, Kataoka & Bittencourt (2014) confrontaram os resultados da análise experimental

e da modelagem tridimensional de pilares de concreto com taxas de armadura de 0%, 1,4% e 2,8%, carregados com 30% e 40% da resistência média a compressão aos 7 dias no programa computacional Diana 9.3.

Na modelagem do concreto, Kataoka & Bittencourt (2014) utilizaram-se elementos sólidos isoparamétricos de 20 nós, baseado na interpolação quadrática e na integração de Gauss e possuindo três graus de liberdade por nó x, y e z. A malha de um dos modelos estruturais tridimensionais dos protótipos de pilares e detalhe do elemento de concreto utilizado podem ser vistos na Figura 1.

Kataoka & Bittencourt (2014) concluem que as simulações calibradas com a curva experimental dos corpos de prova não foram capazes de prever as deformações dos protótipos de pilares, principalmente submetidos à tensão de 40%. Como as simulações com tensão a 30% foram muito próximas, a calibração com a curva dos corpos de prova também se aproximou dos resultados experimentais.

O programa utilizado por Kataoka & Bittencourt (2014) demonstrou ser uma ferramenta de potencial para previsão das deformações ao longo do tempo, embora não seja capaz de reproduzir o comportamento do concreto ao longo do tempo.

Portanto, este trabalho visa analisar analiticamente a redistribuição de tensões devido ao incremento do índice de retangularidade e a diferentes taxas de armação das seções transversais em casos de pilares-parede de pontes.

2. METODOLOGIA E FORMULAÇÃO

2.1 Formulação

Bazant (1972) cita dois tipos de erros associados à análise da fluência. São eles: a pesquisa dos materiais e a simplificação da análise. Assim, Bazant (1972) menciona que o método do módulo efetivo usual fornece erros consideráveis em relação a solução teórica exata da lei de fluência, a partir do momento em que o concreto começa a envelhecer e tem suas propriedades alteradas em função do progresso da hidratação. Logo, foi proposto um refinamento considerando a propriedade de envelhecimento e, como dado de entrada, um único valor do módulo de elasticidade, possibilitando obter valores ilimitados de fluência.

Dessa forma, a Fédération Internationale du Béton (2010) diz que o método do módulo de elasticidade ajustado pode ser aplicado em primeiro lugar para a análise da resposta global dependente do tempo de estruturas de concreto, que podem ser consideradas como homogêneas com base na mesma suposição de homogeneidade reológica efetiva. A Fédération Internationale du Béton (2010) também menciona que a precisão dos resultados normalmente permanece satisfatória se a aplicação é estendida para cobrir os casos de estruturas heterogêneas, compostas por porções de concreto com diferentes propriedades de fluência e/ou contendo elementos de aço.

Para a formulação do problema,

são necessárias equações que permitiram o desenvolvimento e a aplicação nos casos em estudo através do método do módulo de elasticidade ajustado.

A deformação total de uma seção de concreto afetada pela restrição da armadura pode ser dada por:

$$[1] \quad \varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_L + \frac{\Delta\sigma}{E^*}$$

Onde:

ε = deformação relativa total;

ε_0 = deformação relativa instantânea;

ε_L = deformação relativa livre;

$\frac{\Delta\sigma}{E^*}$ = deformação relativa devida aos

aumentos graduais de tensão provocados pelos impedimentos;

$\Delta\sigma$ = variação de tensão;

E^* = módulo de elasticidade ajustado.

O módulo de elasticidade ajustado é definido por:

$$[2] \quad E^* = \frac{E_0}{1 + \chi \cdot \varphi}$$

Onde:

E^* = módulo de elasticidade ajustado;

E_0 = módulo de elasticidade do material no instante t_0 ;

χ = coeficiente de envelhecimento;

φ = coeficiente de fluência.

Já o coeficiente de envelhecimento é:

$$[3] \quad \chi = \frac{1}{1 - e^{-\varphi}} - \frac{1}{\varphi}$$

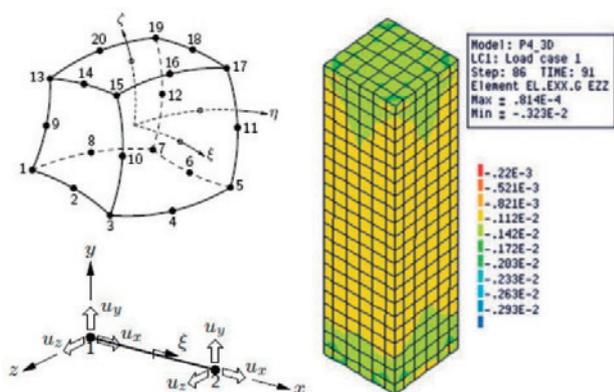


FIGURA 1

MODELO NUMÉRICO DOS PILARES

FONTE: ADAPTADO DE KATAOKA & BITTENCOURT (2014)

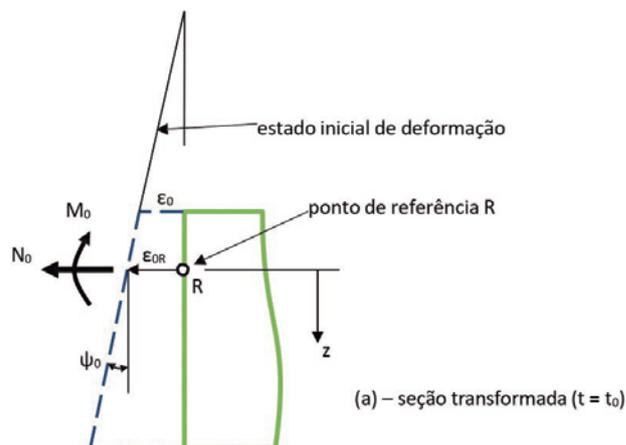


FIGURA 2

SEÇÃO DE PILAR ANALISADO

FONTE: ADAPTADO DE KOPRNA (1986)

Onde:

γ = coeficiente de envelhecimento;

φ = coeficiente de fluência.

Sendo uma seção composta de diferentes materiais caracterizados por suas propriedades reológicas, tem-se que a deformação na seção é:

$$[4] \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_{0R} + \psi_0 * z$$

Onde:

ε_0 = deformação na seção;

ε_{0R} = deformação inicial no eixo de referência;

ψ_0 = curvatura;

z = distância da face ao eixo de referência adotado.

A Figura 2 mostra a distribuição de deformações de uma seção qualquer, simétrica em relação ao plano de flexão, solicitada por um momento M_0 e uma força normal N_0 atuando num ponto de referência 'R'. Conforme explica Martins (2014), a seção transversal permanece plana após a deformação, conforme a hipótese de Navier, para qualquer fibra situada a uma distância 'z' do ponto de referência 'R'.

A deformação inicial no eixo de referência pode ser obtida através de:

$$[5] \quad \varepsilon_{0R} = \frac{N_0 * I - M_0 * B}{E_{ref} * (A * I - B^2)}$$

Onde:

N_0 = esforço normal inicial;

I = momento de inércia;

M_0 = momento fletor inicial;

B = momento estático;

E_{ref} = módulo de elasticidade de referência;

A = área da seção transversal.

A curvatura é dada por:

$$[6] \quad \psi_0 = \frac{-N_0 * B + M_0 * A}{E_{ref} * (A * I - B^2)}$$

Onde:

ψ_0 = curvatura;

N_0 = esforço normal inicial;

I = momento de inércia;

M_0 = momento fletor inicial;

B = momento estático;

E_{ref} = módulo de elasticidade de referência;

A = área da seção transversal.

A relação entre o módulo do aço e o módulo de elasticidade de referência é:

$$[7] \quad \alpha_{eq} = \frac{E_s}{E_{ref}}$$

Onde:

α_{eq} = coeficiente de equivalência;

E_s = módulo de elasticidade do aço;

E_{ref} = módulo de elasticidade de referência.

E o coeficiente de equivalência ajustado é:

$$[8] \quad \alpha_{eq}^* = \frac{E_s}{E_{ref}^*}$$

Assim, o esforço normal fictício agindo no centro de gravidade da camada considerada:

$$[9] \quad N^* = E_j^* \cdot A_j \cdot \varepsilon_{Lj}$$

Onde:

N^* = esforço normal fictício agindo no centro de gravidade da camada considerada;

E_j^* = módulo de elasticidade ajustado da j-ésima camada;

ε_{Lj} = deformação relativa livre no centro de gravidade da camada considerada.

2.2 Metodologia

Neste trabalho, analisou-se a redistribuição de tensões no concreto e no aço devido à retração e fluência em famílias de pilares-parede de concreto armado, com diferentes taxas de armação, submetidas à uma carga denominada 'N', que é força normal máxima aplicada no pilar-parede. Para o cálculo de retração e fluência, foram utilizadas as formulações do Model Code 2010, considerando as propriedades dos materiais e parâmetros geométricos das seções transversais dos pilares. Considerou-se uma resistência característica à compressão de 45 MPa e Cimento CP ARI (alta resistência inicial) com as seguintes propriedades conforme definido pelo Model Code 2010: coeficiente em função da classe de resistência do concreto $\alpha = 1$, $s = 0,20$, $\alpha_{bs} = 600$, $\alpha_{ds1} = 6$, $\alpha_{ds2} = 0,012$ e

$\alpha_E = 1,0$ (agregado de brita quartzítica).

Adotou-se como

tempo de carga

$t_0 = 7$ dias, tempo

de fim da cura

$t_s = 3$ dias, tempo

infinito $t_{\infty} = 10.000$

dias, umidade

$RH = 85\%$ e

temperatura

$T = 23$ °C. Para o

cálculo do módulo

de elasticidade

aos 28 dias, utilizou-se a

Equação

10, considerando a

resistência média à compressão

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa.

$$[10] \quad E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade em MPa na idade do concreto de 28 dias;

$E_{c0} = 21,5 \cdot 10^3$ MPa;

α_E = parâmetro em função da natureza do agregado graúdo;

f_{cm} = resistência média à compressão do concreto.

Para o cálculo do módulo de elasticidade aos 7 dias, sendo este o módulo referência (E_0), utilizado na formulação descrita no item 2.1, foram utilizadas as Equações 11 e 12.

$$[11] \quad \beta(t) = e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right)}$$

$$[12] \quad \frac{E_{cij}}{E_{ci}} = (\beta(t))^{0,50}$$

Foram definidas três famílias de pilares-parede de dimensões 1300 mm x H, 1500 mm x H e 1700 mm x H, sendo 'H' o valor da dimensão correspondente à multiplicação daquela indicada, pelo índice de retangularidade 'C' correspondente. Considerando a relação limite para classificação de pilares em pilares-parede segundo a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014), variou-se o índice de retangularidade de 5 até 10. Foram consideradas seis taxas de armação, sendo cinco destas variando segundo uma progressão aritmética de razão 0,8, de 0,8% até 4%, e a última taxa igual a 8%, valor máximo permitido para pilares de acordo com a

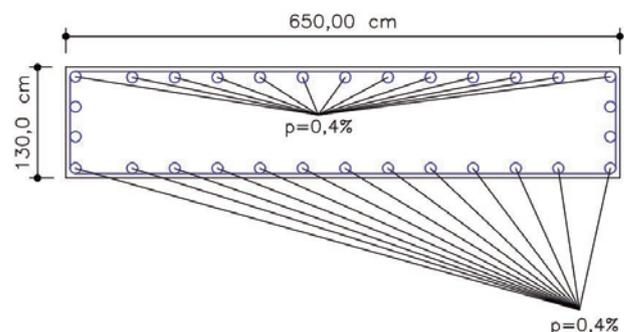


FIGURA 3
SEÇÃO DE PILAR ANALISADO
FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 1

MODELOS DE PILARES-PAREDE CONFORME GEOMETRIA

ρ	C	b =1300 mm	b =1500 mm	b =1700 mm
0,8%	5	0,8PP1300/C=5	0,8PP1500/C=5	0,8PP1700/C=5
1,6%	6	1,6PP1300/C=6	1,6PP1500/C=6	1,6PP1700/C=6
2,4%	7	2,4PP1300/C=7	2,4PP1500/C=7	2,4PP1700/C=7
3,2%	8	3,2PP1300/C=8	3,2PP1500/C=8	3,2PP1700/C=8
4,0%	9	4,0PP1300/C=9	4,0PP1500/C=9	4,0PP1700/C=9
8,0%	10	8,0PP1300/C=10	8,0PP1500/C=10	8,0PP1700/C=10

ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014). A Figura 3 representa um destes casos, em que se pode visualizar um pilar da família de 1300 mm x H, com C = 5 e taxa de armação total $\rho = 0,8\%$.

Na Tabela 1, estão reunidos todos os modelos de pilares objetos desta etapa de análise, cujas nomenclaturas foram definidas de acordo com a taxa de armação, índice de retangularidade e dimensões 'b' correspondente a cada uma das três famílias.

Foi adotado um valor de 'N' igual ao limite de $50\% \cdot f_{ck}$ para cada uma das 3 (três) famílias de pilares-parede, considerando as áreas das seções com C = 5 para o cálculo inicial de 'N'. Sendo assim, definiu-se os seguintes valores para N, conforme mostrado na Tabela 2.

Considerando a situação de projeto de pilares de pontes, adotou-se a classe de agressividade ambiental (CAA) III e cobertura c = 40 mm. Conforme mostrado no corte longitudinal da Figura 4, é possível visualizar o posicionamento das armações ρ_1 e ρ_2 , de acordo com o cobrimento adotado, e o ponto de referência 'R' utilizado para cálculo do momento de inércia das armações e do momento estático da seção transformada, adotado à meia altura. Para os casos estudados neste trabalho, tem-se que $\rho_1 = \rho_2$, e, portanto, o ponto de referência 'R' coincide com o centro de gravidade da seção transformada.

Foram definidas duas seções retangulares com áreas equivalentes à de dois modelos de pilares-parede definidos na Tabela 2, com o objetivo de estabelecer comparativos entre situações em que apenas a espessura fictícia 'h' muda de uma peça para outra. A Tabela 3 mostra os modelos

TABELA 2

MODELOS DE PILARES-PAREDE CONFORME GEOMETRIA

Família	Área de referência (mm ²)	N
1300 x H	1300 x 6500	-1,901·108 N
1500 x H	1500 x 7500	-2,531·108 N
1700 x H	1700 x 8500	-3,251·108 N

referentes as seções de 4500 x 4500 mm² (h = 2250 mm) e 3800 x 3800 mm² (h = 1900 mm), considerando as diferentes taxas de armação.

Com o objetivo de quantificar os valores de redistribuição de tensões em pilares-parede de seção transversal utilizada em projetos reais, verificou-se na Ponte Juscelino Kubitschek, localizada em Brasília-DF, a existência de pilares com alto índice de retangularidade no trecho estaiado. A Tabela 4 mostra os dados da geometria dos pilares citados.

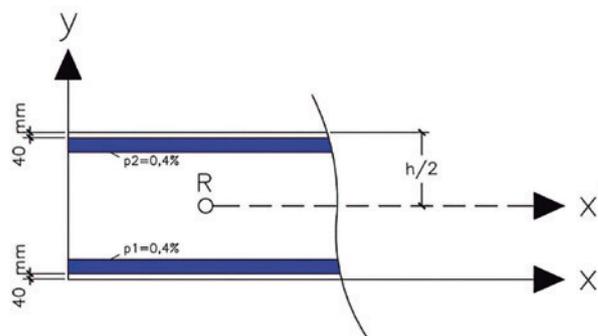
3. PONTE JK

A Ponte Juscelino Kubitschek, também conhecida como Ponte JK, assim como a Ponte Costa e Silva, inau-

gurada em 1976, e a Ponte das Garças, que é a mais antiga dentre estas três, foi concebida para ligar o Lago Sul à parte central de Brasília (DANTAS, 2011).

A Ponte JK, projetada pelo arquiteto Alexandre Chan, sendo seu projeto escolhido no âmbito do Concurso Nacional de Estudos Preliminares de Arquitetura, em dezembro de 1998, teve sua construção iniciada em junho de 2000 e sua inauguração em 15 de dezembro de 2002 (ALMEIDA, 2021). A Figura 5 mostra uma vista geral da ponte JK.

Esta ponte, em curva, com raio de 3.150 m, desenvolve-se em 1.200 m de comprimento, com largura do tabuleiro de 24 m e contempla duas pistas com 3 faixas cada e dois passeios de pedestres. A estrutura principal

**FIGURA 4**

SEÇÃO LONGITUDINAL DOS PILARES-PAREDE

FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 3

MODELOS DE PILARES DE SEÇÃO QUADRADA E EQUIVALENTES

ρ	S =4500x4500 mm ²	Equivalente	S =3800x3800 mm ²	Equivalente
0,8%	0,8PQ4500		0,8PQ3800	
1,6%	1,6PQ4500		1,6PQ3800	
2,4%	2,4PQ4500	PP1500/C=9	2,4PQ3800	PP1700/C=5
3,2%	3,2PQ4500		3,2PQ3800	
4,0%	4,0PQ4500		4,0PQ3800	
8,0%	8,0PQ4500		8,0PQ3800	

TABELA 4

GEOMETRIA DOS PILARES-PAREDE ANALISADOS DA PONTE JK

B (mm)	H (mm)	C	ρ	Nomenclatura
2000	11000	5,5	—	PPJK
1,6%	6	1,6PP1300/C=6	1,6PP1500/C=6	1,6PP1700/C=6

da ponte é formada por três arcos oblíquos ao eixo curvo da ponte. Os arcos são em aço, com vão livre de 240 metros cada um. O tabuleiro é uma estrutura de aço, ortótropa, sustentada por 16 tirantes, formados por 10 cabos com 31 e 6 cabos com 41 cordoalhas galvanizadas, de sete fios (ALMEIDA, 2021). A Figura 6 contempla uma vista em elevação e uma planta da Ponte JK.

Quanto aos pilares da ponte, tem-se duas configurações distintas: pilares inclinados de seção transversal losangular vazada de concreto armado distribuídos ao longo de cada trecho de acesso e pilares-parede principais, de seção transversal retangular, de concreto armado, que compõem o trecho estaiado e em arco da ponte JK. A Figura 7 mostra um corte da seção transversal dos pilares-parede da obra de arte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Família de pilares 1300, 1500, 1700 mm x H

Após a análise dos resultados mostrados na Tabela 5*, pode-se observar que, com o aumento da retangularidade do pilar-parede, considerando um mesmo valor de $N_0 = -1,901 \cdot 10^8 \text{ N}$ ($50\% \cdot f_{ck}$) para todos os casos da família de pilar '1300 mm x h', foi benéfico no sentido de conferir uma maior margem para a redistribuição de tensões no concreto sem ultrapassar a tensão máxima admitida de $0,5 \cdot f_{ck}$. A Seção de 1300 mm x 6500 mm encontra-se, teoricamente, limitada a qualquer acréscimo de tensão no concreto. Na Tabela 5, para $\rho = 8,0\%$, o aumento de tensões no concreto devido aos efeitos diferidos (retração e fluência somadas) foi

de 4,61 MPa, representando um incremento de 20,48% em relação a tensão inicialmente admitida de 22,5 MPa.

Na Tabela 6, da família de pilares 1300 mm x 7800 mm, para $\rho = 8,0\%$, o aumento de tensões no concreto foi de 4,16 MPa. Considerando a tensão inicialmente atuante nessa seção, de 18,75 MPa ($1,901108 \text{ N} / (1300 \text{ mm} \times 7800 \text{ mm})$), quando for acrescido o valor de 4,16, o valor final da tensão, considerando a redistribuição será de 22,91 MPa e, portanto, acima da tensão limite.

Aumentando o índice de retangularidade do pilar para $C = 7$, serão obtidos valores de tensão abaixo de $0,5 \cdot f_{ck}$, com o aumento de tensões no concreto de 3,83 MPa, e tensão total de 19,90 MPa ($16,07 \text{ MPa} + 3,83 \text{ MPa}$). Na Tabela 9, são mostrados os resultados da família de pilares de 1300 mm x 11700 mm ($C = 9$), de dimensões utilizadas nos pilares-paredes do trecho estaiado da Ponte da Laguna e cujo valor de N é da mesma ordem de grandeza (aproximadamente $3,2 \cdot 10^8$) da utilizada nesta análise (ENESCIL, 2016). Nestes, a tensão verificada, de maneira simplificada, está em 12,49 MPa, o valor do aumento de tensões no concreto foi de 3,40 MPa. Portanto, os resultados mostram uma margem bastante confortável em relação à tensão limite para esta análise.

Os resultados

das Tabelas 5 a 10 mostram que a variação da retração entre as famílias de pilares não foi significativa, não ultrapassando 4,19%, considerando os valores $-3,58 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}^2$ e $-3,43 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}^2$, correspondentes, respectivamente aos modelos 8PP1300/C = 5 e 0,8PP1300/C = 10. Porém, dentro os modelos de cada família, os aumentos percentuais máximos de tensão devido a retração, considerando o aumento da taxa de armação, foram de, ao menos de +469,83%, verificado entre os modelos 0,8PP1300/C = 5 e 8,0PP1300/C = 10.

Reunindo-se os valores de aumento de tensão máxima no concreto ($AP_{\text{máx}}$), devido a retração e fluência combinadas, em cada um dos modelos PP1300/C = 5 e PP1300/C = 10, e as reduções percentuais (RP) entre estes modelos, encontrou-se os valores indicados na Tabela 11. Para o modelo PP1300/C = 5, o $AP_{\text{máx}}$ foi de 149,19% resultante do comparativo entre a menor taxa de armação, de 0,8%, e a maior taxa, de 8,0%. No modelo PP1300/C = 10, o



FIGURA 5
PONTE JUSCELINO KUBITSCHKEK
FONTE: AUTORES (2023)

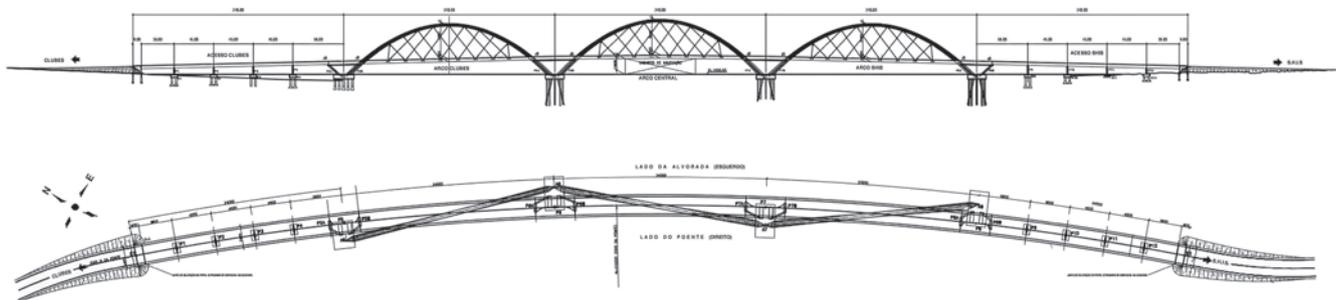


FIGURA 6
VISTA EM ELEVÇÃO E PLANTA DA PONTE JK
FONTE: PROJCONSULT (2002)

*CONSULTE ESTA E AS DEMAIS TABELAS REFERIDAS NO ARTIGO NA VERSÃO ON-LINE DA REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES.

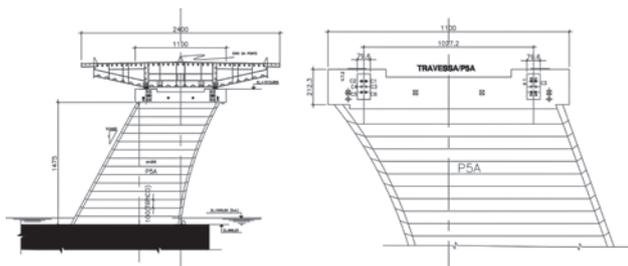


FIGURA 7

PILARES-PAREDE INCLINADOS DO TRECHO ESTAIADO

FONTE: PROJCONSULT (2002)

aumento percentual máximo foi de 197,25% e, portanto, maior que o caso de $C = 5$. Porém, verificou-se que os valores absolutos de aumento de tensão dos modelos PP1300/ $C = 10$, se mostraram inferiores. Logo, para aferir esta variação, incluiu-se na análise o parâmetro redução percentual (RP) entre os modelos. Do modelo 0,8PP1300/ $C = 5$ para o 0,8PP1300/ $C = 10$ a redução percentual foi de -41,08%. Com o aumento da taxa de armação, verificou-se que a redução percentual entre os modelos diminuiu. Isto é explicado pela menor deformação livre do concreto verificada em seções mais armadas.

Para análise dos pilares-parede da família 1500 mm x H, considerou-se um valor constante de $N_0 = -2,531 \cdot 10^8$ N para todos os modelos decorrentes da variação do índice de retangularidade 'C' e das taxas de armação 'p'. A Tabela 12 mostra os resultados de aumento e redistribuição de tensões para a seção de 1500 mm x 7500 mm, que está limitada a qualquer acréscimo devido à condição de cálculo de 'N' descrita na metodologia. Para a seção seguinte, com $C = 6$, a tensão atuante é de 18,75 MPa e aumento de tensões máximo é de 4,03 MPa, para $p = 8,0\%$, valor 3,13% menor que o verificado na família anterior. Para esta taxa de armação, a tensão verificada, considerando os efeitos diferidos é de 22,78 e, portanto, acima do limite de 22,5 MPa.

Para a família 1500 x H, verificaram-se as mesmas situações de $AP_{m\acute{a}x}$ e RP entre os modelos, porém, verificou-se uma redução do aumento percentual máximo de -4,38% para $C = 5$ e de -5,66% para $C = 10$, conforme mostrado na Tabela 18. Isto é explicado pelo aumento da seção transversal, que confere maior espessura fictícia.

Nos modelos de pilares-parede da família 1700 mm x H, adotou-se $N_0 = -3,251 \cdot 10^8$ N para o cálculo do aumento de tensões nas peças. Verificou-se que, nas peças com taxa de armação de 8%, somente a partir do índice de retangularidade

$C = 7$, as tensões finais permaneceram abaixo de $50\% \cdot f_{ck}$.

Para a família 1700 x H, verificou-se uma redução no aumento percentual máximo de 7,75% para $C = 5$ e de 9,63% para $C = 10$, em rela-

ção a família 1300 x H, conforme mostrado na Tabela 25. Com o aumento da espessura fictícia, diminui-se o perímetro da seção transversal em contato com a atmosfera e, portanto, os efeitos conferidos pela retração reduzem sua magnitude.

4.2 Seções equivalentes

Para efeito de comparação, foram analisados os resultados em duas seções de pilares quadrados com áreas equivalentes à de duas famílias de pilares-parede. Na Tabela 26 são mostrados os resultados de redistribuição de tensões no pilar de seção 4500 mm x 4500 mm, equivalente à fami-

lia de pilares-parede 1500 mm x 13500 mm, com índice de retangularidade $C = 9$. Da Tabela, pode-se constatar que, na situação crítica, com $p = 8,0\%$, o aumento de tensões foi de $-2,90 \cdot 10^{-3}$ kN/mm² e, portanto, menor que o verificado na seção equivalente, em que se verificou um aumento de $-3,27 \cdot 10^{-3}$ kN/mm², o que representa uma variação de 12,75%.

Analisando os resultados de redistribuição de tensões num outro pilar de seção quadrada de 3800 mm x 3800 mm, com área equivalente ao modelo de pilar-parede PP1700/ $C = 5$, verificou-se que para uma taxa de armação $p = 8,0\%$, o aumento de tensões foi -5,03% menor que o verificado na seção de alta retangularidade, reduzindo de $-4,37 \cdot 10^{-3}$ kN/mm² para $-4,15 \cdot 10^{-3}$ kN/mm², conforme mostrado nas Tabelas 27 e 19.

Esta diferença de valores é explicada pelo aumento da espessura fictícia h nas seções quadradas. Na seção de 4500 x 4500 mm², por exemplo, tem-se que $h = 2250$ mm, enquanto na seção equivalente o valor de 'h' é 1350 mm. Na seção de 3800 x 3800 mm², o

TABELA 11

REDUÇÃO PERCENTUAL DE TENSÕES — PILARES 1300 x H

ρ	$\Delta\sigma_C$ (RETRAÇÃO+FLUÊNCIA) — kN/mm ²		RP (%)
	C=5	C=10	
0,8%	-1,85E-03	-1,09E-03	-41,08%
1,6%	-2,28E-03	-1,44E-03	-36,84%
2,4%	-2,66E-03	-1,75E-03	-34,21%
3,2%	-3,00E-03	-2,03E-03	-32,33%
4,0%	-3,32E-03	-2,27E-03	-31,62%
8,0%	-4,61E-03	-3,24E-03	-29,71%
$AP_{m\acute{a}x}$	+149,19%	+197,25%	—

TABELA 18

REDUÇÃO PERCENTUAL DE TENSÕES — PILARES 1500 x H

ρ	C=5 (kN/mm ²)	C=10 (kN/mm ²)	RP (%)
0,8%	-1,83E-03	-1,07E-03	-41,53%
1,6%	-2,23E-03	-1,40E-03	-37,22%
2,4%	-2,60E-03	-1,69E-03	-35,00%
3,2%	-2,93E-03	-1,95E-03	-33,45%
4,0%	-3,23E-03	-2,19E-03	-32,19%
8,0%	-4,48E-03	-3,12E-03	-30,36%
$AP_{m\acute{a}x}$	+144,81%	+191,59%	—

TABELA 25

REDUÇÃO PERCENTUAL DE TENSÕES — PILARES 1700 x H

ρ	C=5 (kN/mm ²)	C=10 (kN/mm ²)	RP (%)
0,8%	-1,81E-03	-1,05E-03	-41,99%
1,6%	-2,20E-03	-1,37E-03	-37,73%
2,4%	-2,55E-03	-1,65E-03	-35,29%
3,2%	-2,86E-03	-1,90E-03	-33,57%
4,0%	-3,16E-03	-2,12E-03	-32,91%
8,0%	-4,37E-03	-3,02E-03	-30,89%
AP _{máx}	+141,44%	+187,62%	—

TABELA 26

SEÇÃO QUADRADA 4500 MM x 4500 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa Equivalente à 1500 mm x 13500 mm (C=9)					
ρ	$\Delta\sigma_C$ (retração)	$\Delta\sigma_C$ (fluência)	$\Delta\sigma_C$ (R+F)	$\Delta\sigma_{AÇO}$ (R+F)	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-2,59E-04	-8,27E-04	-1,09E-03	-1,24E-01	114,02
1,6%	-4,78E-04	-8,94E-04	-1,37E-03	-1,21E-01	87,91
2,4%	-6,66E-04	-9,60E-04	-1,63E-03	-1,18E-01	72,38
3,2%	-8,28E-04	-1,03E-03	-1,86E-03	-1,15E-01	62,03
4,0%	-9,70E-04	-1,09E-03	-2,06E-03	-1,13E-01	54,60
8,0%	-1,48E-03	-1,43E-03	-2,90E-03	-1,03E-01	35,51

TABELA 27

SEÇÃO QUADRADA 3800 MM x 3800 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa Equivalente à 1700 mm x 8500 mm (C=5)					
ρ	$\Delta\sigma_C$ (retração)	$\Delta\sigma_C$ (fluência)	$\Delta\sigma_C$ (R+F)	$\Delta\sigma_{AÇO}$ (R+F)	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-2,78E-04	-1,49E-03	-1,77E-03	-2,02E-01	114,03
1,6%	-5,12E-04	-1,61E-03	-2,12E-03	-1,98E-01	93,08
2,4%	-7,13E-04	-1,73E-03	-2,44E-03	-1,94E-01	79,36
3,2%	-8,87E-04	-1,85E-03	-2,74E-03	-1,91E-01	69,61
4,0%	-1,04E-03	-1,97E-03	-3,01E-03	-1,87E-01	62,29
8,0%	-1,58E-03	-2,57E-03	-4,15E-03	-1,74E-01	42,01

TABELA 28

PILAR DE SEÇÃO 2000 MM x 11000 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 5,5 h = 1692,31 mm					
ρ	$\Delta\sigma_C$ (retração)	$\Delta\sigma_C$ (fluência)	$\Delta\sigma_C$ (R+F)	$\Delta\sigma_{AÇO}$ (R+F)	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-2,92E-04	-7,63E-04	-1,06E-03	-1,20E-01	114,04
1,6%	-5,38E-04	-8,25E-04	-1,36E-03	-1,17E-01	85,69
2,4%	-7,49E-04	-8,86E-04	-1,64E-03	-1,14E-01	69,50
3,2%	-9,32E-04	-9,47E-04	-1,88E-03	-1,11E-01	58,99
4,0%	-1,09E-03	-1,01E-03	-2,10E-03	-1,08E-01	51,57
8,0%	-1,66E-03	-1,32E-03	-2,98E-03	-9,83E-02	33,01

valor de 'h' verificado é igual a 1900 mm, o que representa um valor bem acima de 1530 mm verificado para a seção equivalente de 1700 mm x 15300 mm. O aumento da espessura fictícia 'h' é oriundo da redução do perímetro exposto da peça à umidade ambiente, o que acaba por restringir o encurtamento da peça por retração.

4.3 Pilares-Parede da Ponte JK

Utilizando a geometria dos pilares-parede do trecho estaiado da Ponte JK, com dimensões de 2000 mm x 11000 mm, e índice de retangularidade C = 5,5, estabeleceram-se comparativos em relação ao modelo PP1500/C = 10, de seção 1500 mm x 15000 mm, que possui área equivalente à seção de PPJK. Foi adotado o valor de $N_0 = -2,531 \cdot 10^8$ N, e verificou-se os valores de aumento de tensões que este tipo de geometria existente na Ponte JK, obedecendo as condições de contorno definidas na metodologia deste trabalho. Considerando a tensão atuante na seção de 11,50 MPa, e o aumento de tensões no concreto de 2,98 MPa, ter-se-ia uma tensão total de 14,48 MPa e, portanto, bastante confortável em relação ao limite de $0,5 \cdot f_{ck}$.

Porém, no aço, o aumento de tensões máximas devido à redistribuição foi de 120 MPa, conforme mostrado na Tabela 28. Isto representa um acréscimo de 193,05% em relação a tensão inicial atuante, de 62,16 MPa. Em situações em que a estrutura está submetida às manifestações patológicas de ataque ao concreto, por exemplo, a armação dos pilares pode perder seção nominal e, conseqüentemente, sua capacidade resistiva. Sendo assim, um aumento de tensões de valor igual a 24,0% do limite ao escoamento do aço CA-50 (500 MPa), pode levar a uma situação crítica a depender das condições de contorno ambientais da peça.

Estabeleceu-se um elo entre a análise teórica proposta e a situação de serviço da obra de arte, após levantamento de relatórios técnicos de monitoramento. Após inspeção realizada na Ponte JK, a serviço da Companhia Urbanizadora da Nova Capital (NOVACAP), foi elaborado um mapa de danos nos pilares do trecho estaiado, conforme pode ser visto na Figura 8. Pôde ser observada a propagação de manifestações patológicas do tipo fissura e que estas se distribuíam majoritariamente de maneira

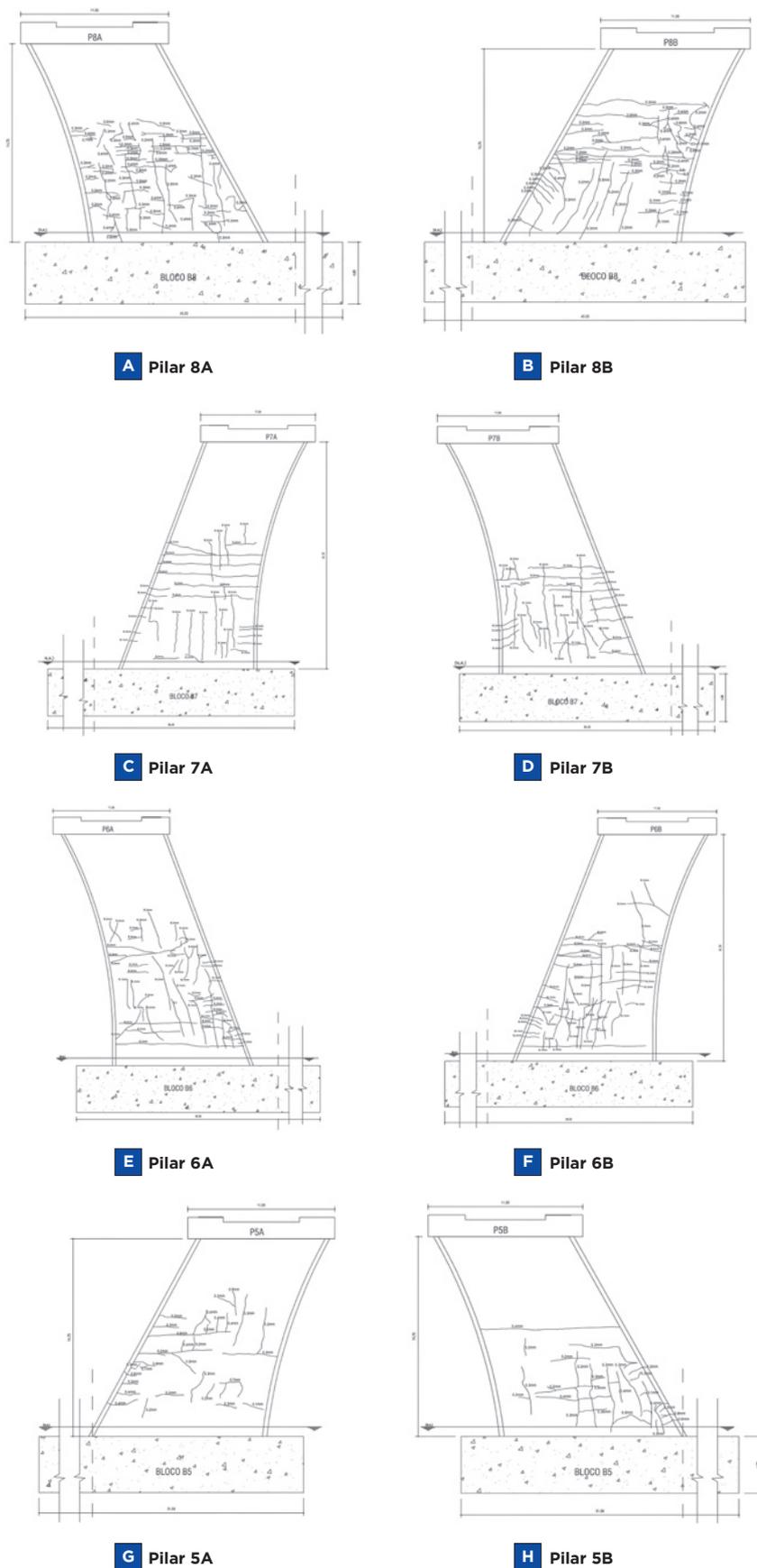


FIGURA 8

PILARES-PAREDE INCLINADOS DO TRECHO ESTAIADO

FONTE: LSE (2012)

difusa e mais concentrada na região de encontro com os blocos.

Conforme o relatório de Almeida (2021), a Ponte JK foi interditada parcialmente em 2011 devido à ruptura do berço dos aparelhos de apoio dos pilares P6B e P7A, mostrados anteriormente na Figura 8. Estes pilares apresentavam intensa fissuração do trecho de ligação com o bloco de fundação até sua porção medial, o que pode ter ocasionado o evento mostrado na Figura 9.

4.4 Análise comparativa

Após a observação dos resultados, realizou-se a análise comparativa entre as famílias de pilares, para observar a variação de tensões no concreto e no aço devido aos efeitos diferidos (retração e fluência somadas), de acordo com o aumento da taxa de armadura.

A Figura 10 apresenta o gráfico que relaciona a tensão no concreto devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para as famílias de pilares 1300 mm x 6500 mm, 1300 mm x 7800 mm, 1300 mm x 9100 mm, 1300 mm x 10400 mm, 1300 mm x 11700 mm e 1300 mm x 13000 mm.

Pode-se observar que as maiores tensões de compressão devido à redistribuição ocorreram quanto menor for o valor de H e maior a taxa de armadura.

A Figura 11 exibe o gráfico que relaciona a tensão no aço devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para as famílias de pilares 1300 mm x 6500 mm, 1300 mm x 7800 mm, 1300 mm x 9100 mm, 1300 mm x 10400 mm, 1300 mm x 11700 mm e 1300 mm x 13000 mm.

Já no aço, destaca-se que houve redução de tensões de compressão devido à redistribuição com o aumento do valor de H e aumento da taxa de armadura. Menciona-se, também, por exemplo, para uma seção transversal de 1300 mm x 6500 mm, que o aumento de tensões máximas devido à redistribuição no aço foi de 212 MPa para a taxa de armadura de 0,8%, que corresponde a um acréscimo de 174,4% em relação a tensão inicial atuante, de 121,56 MPa.

Já a Figura 12 mostra o gráfico que relaciona a tensão no concreto devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para



FIGURA 9

RUPTURA DO BERÇO DO APARELHO DE APOIO

FONTE: LSE (2012)

as famílias de pilares 1500 mm x 7500 mm, 1500 mm x 9000 mm, 1500 mm x 10500 mm, 1500 mm x 12000 mm, 1500 mm x 13500 mm e 1500 mm x 15000 mm.

Pode-se observar, também, que as

taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para as famílias de pilares 1500 mm x 7500 mm, 1500 mm x 9000 mm, 1500 mm x 10500 mm, 1500 mm x 12000 mm, 1500 mm x 13500 mm e 1500 mm x 15000 mm.

maiores tensões de compressão devido à redistribuição ocorreram quanto menor for o valor de H e maior a taxa de armadura.

A Figura 13 expõe o gráfico que relaciona a tensão no aço devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para as famílias de pilares 1500 mm x 7500 mm, 1500 mm x 9000 mm, 1500 mm x 10500 mm, 1500 mm x 12000 mm, 1500 mm x 13500 mm e 1500 mm x 15000 mm.

Enquanto no aço, ressalta-se que também houve redução de tensões de compressão devido à redistribuição com o aumento do valor de H e aumento da taxa de armadura. Cita-se, também, por exemplo, para uma seção transversal de 1500 mm x 7500 mm, que o aumento de tensões máximas devido à redistribuição no aço foi de 209 MPa para a taxa de armadura de 0,8%, que corresponde a um acréscimo de 171,93% em relação a tensão inicial atuante, de 121,56 MPa.

Enquanto a Figura 14 apresenta o gráfico que relaciona a tensão no concreto devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para as famílias de pilares 1700 mm x 8500 mm, 1700 mm x 10200

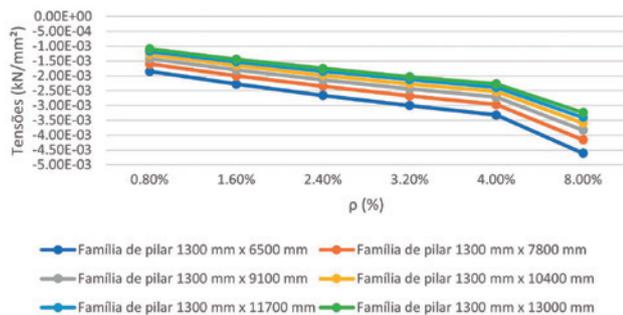


FIGURA 10

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO CONCRETO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA AS FAMÍLIAS DE PILARES 1300 MM X H

FONTE: AUTORES (2023)

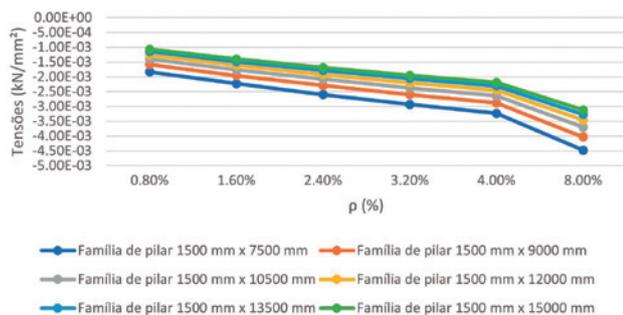


FIGURA 12

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO CONCRETO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA AS FAMÍLIAS DE PILARES 1500 MM X H

FONTE: AUTORES (2023)

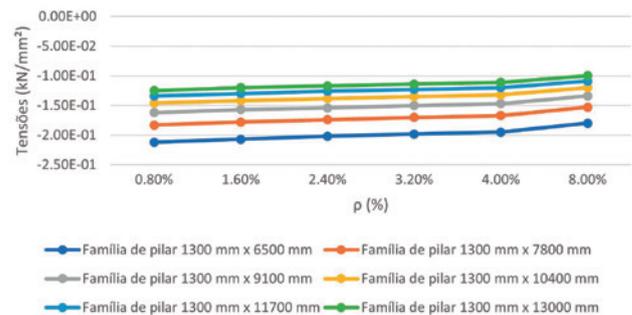


FIGURA 11

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO AÇO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA AS FAMÍLIAS DE PILARES 1300 MM X H

FONTE: AUTORES (2023)

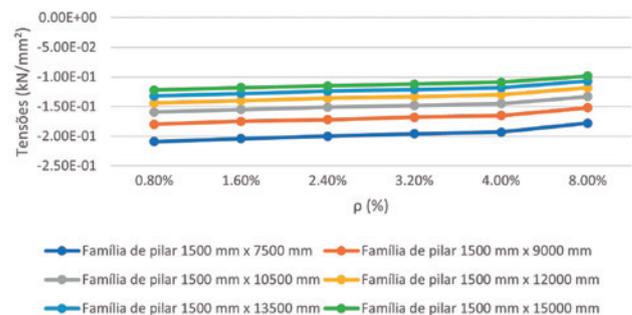


FIGURA 13

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO AÇO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA AS FAMÍLIAS DE PILARES 1500 MM X H

FONTE: AUTORES (2023)

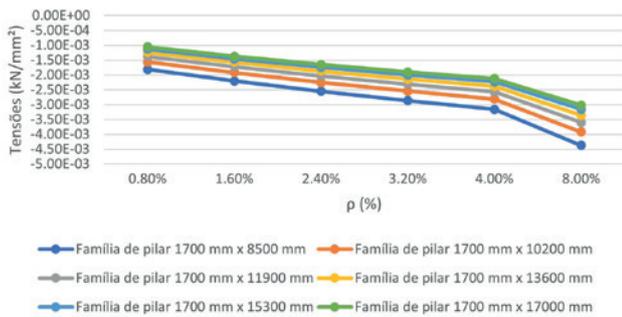


FIGURA 14

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO CONCRETO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA AS FAMÍLIAS DE PILARES 1700 MM X H

FONTE: AUTORES (2023)

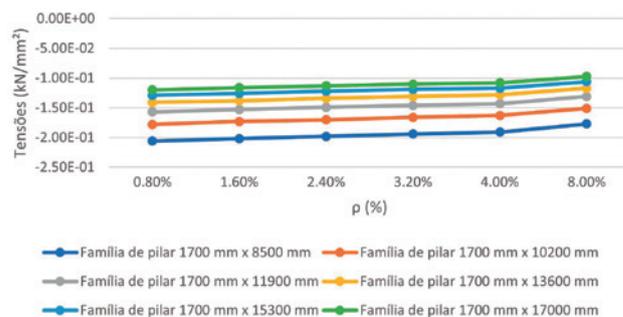


FIGURA 15

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO AÇO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA AS FAMÍLIAS DE PILARES 1700 MM X H

FONTE: AUTORES (2023)

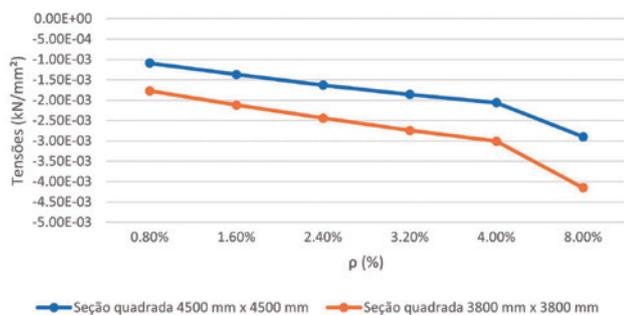


FIGURA 16

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO CONCRETO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA PILARES DE SEÇÃO QUADRADA 4500 MM X 4500 MM E 3800 MM X 3800 MM

FONTE: AUTORES (2023)

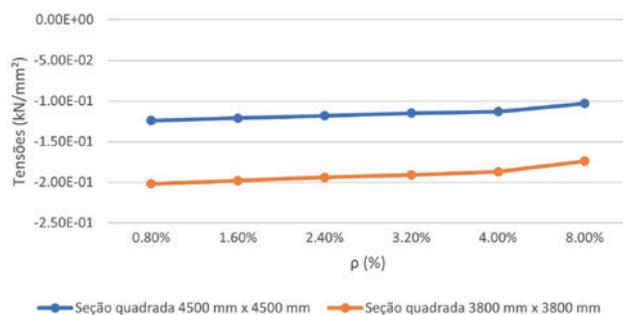


FIGURA 17

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO AÇO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA PILARES DE SEÇÃO QUADRADA 4500 MM X 4500 MM E 3800 MM X 3800 MM

FONTE: AUTORES (2023)

mm, 1700 mm x 11900 mm, 1700 mm x 13600 mm, 1700 mm x 15300 mm e 1700 mm x 17000 mm.

Pode-se notar, também, que as maiores tensões de compressão devido à redistribuição ocorreram quanto menor for o valor de H e maior a taxa de armadura.

A Figura 15 exhibe o gráfico que relaciona a tensão no aço devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para as famílias de pilares 1700 mm x 8500 mm, 1700 mm x 10200 mm, 1700 mm x 11900 mm, 1700 mm x 13600 mm, 1700 mm x 15300 mm e 1700 mm x 17000 mm.

Já no aço, ressalta-se que também houve redução de tensões de compressão devido à redistribuição, com o aumento do valor de H e aumento da taxa de armadura. Menciona-se, também, por exemplo, para uma seção transversal de 1700 mm x 8500 mm, que o aumento de tensões máximas

devido à redistribuição no aço foi de 206 MPa para a taxa de armadura de 0,8%, que corresponde a um acréscimo de 169,46% em relação a tensão inicial atuante, de 121,56 MPa.

Já a Figura 16 mostra o gráfico que relaciona a tensão no concreto devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para pilares de seção quadrada 4500 mm x 4500 mm e 3800 mm x 3800 mm.

Destaca-se que as maiores tensões de compressão devido à redistribuição ocorreram quanto menor a área de seção transversal e maior a taxa de armadura.

Enquanto a Figura 17 expõe o gráfico que relaciona a tensão no aço devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para pilares de seção quadrada 4500 mm x 4500 mm e 3800 mm x 3800 mm.

A Figura 18 apresenta o gráfico que

relaciona a tensão no concreto devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para o pilar de seção 2000 mm x 11000 mm da Ponte JK.

Já Figura 19 apresenta o gráfico que relaciona a tensão no aço devido ao efeito da retração e fluência e as taxas de armadura de 0,8%, 1,6%, 2,4%, 3,2%, 4% e 8% para o pilar de seção 2000 mm x 11000 mm da Ponte JK.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise paramétrica da redistribuição de tensões em pilares-parede de pontes utilizando as formulações do Model Code 2010 e o Método do Módulo de Elasticidade Ajustado, que se mostrou uma boa alternativa para examinar os efeitos da fluência e da retração nesse tipo de estrutura em virtude da dificuldade de implementação mais

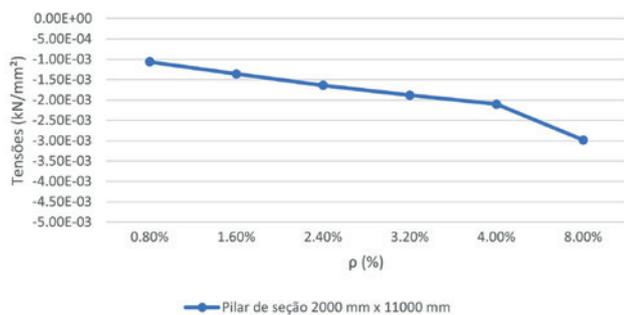


FIGURA 18

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO CONCRETO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA O PILAR DE SEÇÃO 2000 MM X 11000 MM DA PONTE JK

FONTE: AUTORES (2023)

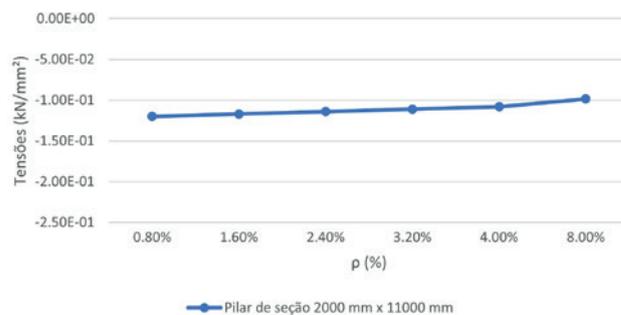


FIGURA 19

GRÁFICO QUE RELACIONA A TENSÃO NO AÇO DEVIDO AO EFEITO DA RETRAÇÃO E FLUÊNCIA E A TAXA DE ARMADURA PARA O PILAR DE SEÇÃO 2000 MM X 11000 MM DA PONTE JK

FONTE: AUTORES (2023)

realista em modelos numéricos. Pois, Kataoka & Bittencourt (2014) e Araújo, Silva e Júnior (2017) demonstraram que existe a necessidade de desenvolvimento de um modelo viscoelástico mais representativo e eficaz dos efeitos de longa duração aplicada em programas computacionais.

A partir das análises, com a mudança das dimensões de diferentes famílias de pilares-parede e uma carga axial proporcional aos modelos iniciais de cada uma dessas famílias, verificou-se que o aumento de tensões se mantém proporcional. Porém, constatou-se que quanto maior a área da seção transversal, menor é a redistribuição de tensões que migram do concreto para o aço. E que, para áreas equivalentes, a seção

retangular transfere mais tensão para o aço do que a seção quadrada. O valor máximo de tensão redistribuída do concreto para o aço ocorreu no modelo 0,8PP1500/C = 5, com $\Delta\sigma = 212$ MPa.

Com a variação da taxa de armadura, verificou-se uma condição inversamente proporcional e constatou-se que quanto mais armada é a peça, maior é a parcela de incremento de tensões no concreto e, conseqüentemente, menor é a migração de tensões para o aço. Em pilares, os efeitos negativos da redistribuição de tensões estão relacionados à sobrecarga das armaduras, podendo levar a situações em que a tensão de escoamento seja superada, resultando em

flambagem, principalmente em seções com perda de capacidade de resistente devido a outros fatores. O aumento da retangularidade dos pilares atua de maneira favorável nesta situação, reduzindo a migração de tensões do concreto para o aço em até 87 MPa, conforme comparativo entre os valores obtidos nos modelos 0,8PP1300/C = 5 e 0,8PP1300/C = 10.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AL-MANASSEER, A.; LAM, J. P. Statistical evaluation of shrinkage and creep models. *ACI Materials Journal*, Farmington Hills, p. 170-176, 2005.
- [2] ALMEIDA, R. O. Especificações técnicas dos serviços de recuperação e reforço estrutural e revitalização da ponte JK. Brasília: NOVACAP, 2021.
- [3] ARAÚJO, C.; SILVA, M. A.; EVANGELISTA JÚNIOR, F. Análise das deflexões máximas de longo termo de uma ponte considerando o envelhecimento e a fluência do concreto. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 38., 2017, Florianópolis. Proceedings [...]. Florianópolis: ABMEC, 2017. p. 1-10.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [5] BAZANT, Z. P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method. *Journal of the American Concrete Institute*, Farmington Hills, v. 69, 69-20, p.212-217, 1972.
- [6] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code, 2010.
- [7] DANTAS, A. G. M. F. O Sistema Viário de Brasília e os Problemas da Integração de um Novo Bairro na Cidade: o Ecovila Setor Noroeste. *Revista Geográfica de América Central*, Costa Rica, II, 15 p., 2011.
- [8] ENESCIL. Alto grau de dificuldade no projeto estrutural. *Revista Estrutura*, São Paulo, v. 2, p. 16-21, 1 out. 2016.
- [9] FAVRE, R.; JACCOUD, J. P.; BURDET, O.; CHARIF, H. Dimensionnement des structures en béton. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1999, 307 p.
- [10] KATAOKA, L. T.; BITTENCOURT, T. N. Análise numérica e experimental da transferência de carga do concreto para a armadura em pilares. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 7, n. 5, p. 747-774, 2014.
- [10] KOPRINA, M. Effets différés: fluage, retrait, relaxation. Institut de statique et structures, Département de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale, 1986.
- [12] LSE. Projeto básico de estruturas: inspeção visual de pilares. Brasília: LSE, 2012.
- [13] MARTINS, P. C. R. Curso de efeitos estruturais da reologia dos materiais. Brasília: UnB, 2014. Apostila (não publicado).
- [14] PROJCONSULT. Projeto executivo: 3ª ponte sobre o lago sul. Brasília: PROJCONSULT, 2002.
- [15] TROST, H. Creep, Relaxation and Shrinkage of Structural Concrete. IABSE reports, p. 59-76, 1991.

Apêndice

TABELA 5

FAMÍLIA DE PILAR 1300 MM X 6500 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 5,0 h = 1083,33 mm					
ρ	Δσ _C (retração)	Δσ _C (fluência)	Δσ _C (R+F)	Δσ _{AÇO} (R+F)	Rel Δσ _{AÇO} / Δσ _C
0,8%	-3,58E-04	-1,50E-03	-1,85E-03	-2,12E-01	114,05
1,6%	-6,60E-04	-1,62E-03	-2,28E-03	-2,07E-01	90,78
2,4%	-9,18E-04	-1,74E-03	-2,66E-03	-2,02E-01	76,19
3,2%	-1,14E-03	-1,86E-03	-3,00E-03	-1,98E-01	66,14
4,0%	-1,34E-03	-1,98E-03	-3,32E-03	-1,95E-01	58,75
8,0%	-2,04E-03	-2,58E-03	-4,61E-03	-1,80E-01	38,99

TABELA 6

FAMÍLIA DE PILAR 1300 MM X 7800 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 6,0 h = 1114,29 mm					
ρ	Δσ _C (retração)	Δσ _C (fluência)	Δσ _C (R+F)	Δσ _{AÇO} (R+F)	Rel Δσ _{AÇO} / Δσ _C
0,8%	-3,53E-04	-1,25E-03	-1,60E-03	-1,83E-01	114,05
1,6%	-6,51E-04	-1,35E-03	-2,00E-03	-1,78E-01	89,04
2,4%	-9,06E-04	-1,45E-03	-2,35E-03	-1,74E-01	73,87
3,2%	-1,13E-03	-1,55E-03	-2,68E-03	-1,70E-01	63,62
4,0%	-1,32E-03	-1,65E-03	-2,97E-03	-1,67E-01	56,20
8,0%	-2,01E-03	-2,15E-03	-4,16E-03	-1,53E-01	36,85

TABELA 7

FAMÍLIA DE PILAR 1300 MM X 9100 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 7,0 h = 1137,50 mm					
ρ	Δσ _C (retração)	Δσ _C (fluência)	Δσ _C (R+F)	Δσ _{AÇO} (R+F)	Rel Δσ _{AÇO} / Δσ _C
0,8%	-3,50E-04	-1,07E-03	-1,42E-03	-1,62E-01	114,05
1,6%	-6,45E-04	-1,16E-03	-1,80E-03	-1,57E-01	87,47
2,4%	-8,98E-04	-1,24E-03	-2,14E-03	-1,54E-01	71,80
3,2%	-1,12E-03	-1,33E-03	-2,44E-03	-1,50E-01	61,42
4,0%	-1,31E-03	-1,41E-03	-2,72E-03	-1,47E-01	53,99
8,0%	-1,99E-03	-1,84E-03	-3,83E-03	-1,34E-01	35,01

TABELA 8

FAMÍLIA DE PILAR 1300 MM X 10400 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 8,0 h = 1155,56 mm					
ρ	Δσ _C (retração)	Δσ _C (fluência)	Δσ _C (R+F)	Δσ _{AÇO} (R+F)	Rel Δσ _{AÇO} / Δσ _C
0,8%	-3,47E-04	-9,36E-04	-1,28E-03	-1,46E-01	114,05
1,6%	-6,40E-04	-1,01E-03	-1,65E-03	-1,42E-01	86,05
2,4%	-8,91E-04	-1,09E-03	-1,98E-03	-1,38E-01	69,96
3,2%	-1,11E-03	-1,16E-03	-2,27E-03	-1,35E-01	59,47
4,0%	-1,30E-03	-1,24E-03	-2,53E-03	-1,32E-01	52,05
8,0%	-1,98E-03	-1,61E-03	-3,59E-03	-1,20E-01	33,41

TABELA 9

FAMÍLIA DE PILAR 1300 MM X 11700 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 9,0 h = 1170,00 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,45E-04	-8,32E-04	-1,18E-03	-1,34E-01	114,05
1,6%	-6,36E-04	-8,98E-04	-1,53E-03	-1,30E-01	84,75
2,4%	-8,86E-04	-9,65E-04	-1,85E-03	-1,26E-01	68,31
3,2%	-1,10E-03	-1,03E-03	-2,13E-03	-1,23E-01	57,74
4,0%	-1,29E-03	-1,10E-03	-2,39E-03	-1,20E-01	50,33
8,0%	-1,96E-03	-1,43E-03	-3,40E-03	-1,09E-01	32,01

TABELA 10

FAMÍLIA DE PILAR 1300 MM X 13000 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E* = 18,33 GPa C = 10,0 h = 1181,81 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,43E-04	-7,48E-04	-1,09E-03	-1,25E-01	114,05
1,6%	-6,34E-04	-8,08E-04	-1,44E-03	-1,20E-01	83,56
2,4%	-8,82E-04	-8,68E-04	-1,75E-03	-1,17E-01	66,82
3,2%	-1,10E-03	-9,29E-04	-2,03E-03	-1,14E-01	56,18
4,0%	-1,29E-03	-9,89E-04	-2,27E-03	-1,11E-01	48,80
8,0%	-1,96E-03	-1,29E-03	-3,24E-03	-9,98E-02	30,77

TABELA 12

FAMÍLIA DE PILAR 1500 MM X 7500 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 5,0 h = 1250,00 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,35E-04	-1,50E-03	-1,83E-03	-2,09E-01	114,05
1,6%	-6,17E-04	-1,62E-03	-2,23E-03	-2,04E-01	91,41
2,4%	-8,59E-04	-1,74E-03	-2,60E-03	-2,00E-01	77,06
3,2%	-1,07E-03	-1,86E-03	-2,93E-03	-1,96E-01	67,08
4,0%	-1,25E-03	-1,98E-03	-3,23E-03	-1,93E-01	59,70
8,0%	-1,91E-03	-2,58E-03	-4,48E-03	-1,78E-01	39,80

TABELA 13

FAMÍLIA DE PILAR 1500 MM X 9000 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 6,0 h = 1285,71 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,30E-04	-1,25E-03	-1,58E-03	-1,80E-01	114,04
1,6%	-6,09E-04	-1,35E-03	-1,96E-03	-1,75E-01	89,72
2,4%	-8,48E-04	-1,45E-03	-2,29E-03	-1,72E-01	74,77
3,2%	-1,06E-03	-1,55E-03	-2,60E-03	-1,68E-01	64,60
4,0%	-1,24E-03	-1,65E-03	-2,88E-03	-1,65E-01	57,18
8,0%	-1,88E-03	-2,15E-03	-4,03E-03	-1,52E-01	37,67

TABELA 14

FAMÍLIA DE PILAR 1500 MM X 10500 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 7,0 h = 1312,50 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,27E-04	-1,07E-03	-1,40E-03	-1,59E-01	114,04
1,6%	-6,04E-04	-1,15E-03	-1,76E-03	-1,55E-01	88,18
2,4%	-8,40E-04	-1,24E-03	-2,08E-03	-1,51E-01	72,73
3,2%	-1,05E-03	-1,33E-03	-2,37E-03	-1,48E-01	62,41
4,0%	-1,22E-03	-1,41E-03	-2,64E-03	-1,45E-01	54,99
8,0%	-1,86E-03	-1,84E-03	-3,70E-03	-1,33E-01	35,83

TABELA 15

FAMÍLIA DE PILAR 1500 MM X 12000 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 8,0 h = 1333,33 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,25E-04	-9,35E-04	-1,26E-03	-1,44E-01	114,04
1,6%	-5,99E-04	-1,01E-03	-1,61E-03	-1,40E-01	86,78
2,4%	-8,34E-04	-1,08E-03	-1,92E-03	-1,36E-01	70,91
3,2%	-1,04E-03	-1,16E-03	-2,20E-03	-1,33E-01	60,47
4,0%	-1,22E-03	-1,23E-03	-2,45E-03	-1,30E-01	53,05
8,0%	-1,85E-03	-1,61E-03	-3,46E-03	-1,18E-01	34,23

TABELA 16

FAMÍLIA DE PILAR 1500 MM X 13500 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 9,0 h = 1350 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,23E-04	-8,31E-04	-1,15E-03	-1,32E-01	114,04
1,6%	-5,96E-04	-8,97E-04	-1,49E-03	-1,28E-01	85,50
2,4%	-8,29E-04	-9,64E-04	-1,79E-03	-1,24E-01	69,27
3,2%	-1,03E-03	-1,03E-03	-2,06E-03	-1,21E-01	58,74
4,0%	-1,21E-03	-1,10E-03	-2,31E-03	-1,18E-01	51,32
8,0%	-1,84E-03	-1,43E-03	-3,27E-03	-1,07E-01	32,81

TABELA 17

FAMÍLIA DE PILAR 1500 MM X 15000 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 10,0 h = 1363,63 mm					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO}/\Delta\sigma_C$
0,8%	-3,21E-04	-7,48E-04	-1,07E-03	-1,22E-01	114,04
1,6%	-5,93E-04	-8,08E-04	-1,40E-03	-1,18E-01	84,33
2,4%	-8,26E-04	-8,68E-04	-1,69E-03	-1,15E-01	67,78
3,2%	-1,03E-03	-9,28E-04	-1,95E-03	-1,12E-01	57,18
4,0%	-1,20E-03	-9,88E-04	-2,19E-03	-1,09E-01	49,78
8,0%	-1,83E-03	-1,29E-03	-3,12E-03	-9,84E-02	31,56

TABELA 19

FAMÍLIA DE PILAR 1700 MM X 8500 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 5,0					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO} / \Delta\sigma_C$
0,8%	-3,16E-04	-1,49E-03	-1,81E-03	-2,06E-01	114,04
1,6%	-5,83E-04	-1,61E-03	-2,20E-03	-2,02E-01	91,94
2,4%	-8,11E-04	-1,73E-03	-2,55E-03	-1,98E-01	77,79
3,2%	-1,01E-03	-1,85E-03	-2,86E-03	-1,94E-01	67,88
4,0%	-1,18E-03	-1,97E-03	-3,16E-03	-1,91E-01	60,52
8,0%	-1,80E-03	-2,58E-03	-4,37E-03	-1,77E-01	40,49

TABELA 20

FAMÍLIA DE PILAR 1700 MM X 10200 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 6,0					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO} / \Delta\sigma_C$
0,8%	-3,12E-04	-1,25E-03	-1,56E-03	-1,78E-01	114,04
1,6%	-5,75E-04	-1,35E-03	-1,92E-03	-1,73E-01	90,29
2,4%	-8,01E-04	-1,45E-03	-2,25E-03	-1,70E-01	75,54
3,2%	-9,96E-04	-1,55E-03	-2,54E-03	-1,66E-01	65,43
4,0%	-1,17E-03	-1,65E-03	-2,81E-03	-1,63E-01	58,02
8,0%	-1,78E-03	-2,15E-03	-3,92E-03	-1,51E-01	38,37

TABELA 21

FAMÍLIA DE PILAR 1700 MM X 11900 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 7,0					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO} / \Delta\sigma_C$
0,8%	-3,09E-04	-1,07E-03	-1,38E-03	-1,57E-01	114,04
1,6%	-5,70E-04	-1,15E-03	-1,72E-03	-1,53E-01	88,78
2,4%	-7,94E-04	-1,24E-03	-2,03E-03	-1,49E-01	73,53
3,2%	-9,87E-04	-1,32E-03	-2,31E-03	-1,46E-01	63,26
4,0%	-1,16E-03	-1,41E-03	-2,57E-03	-1,43E-01	55,84
8,0%	-1,76E-03	-1,84E-03	-3,60E-03	-1,31E-01	36,54

TABELA 22

FAMÍLIA DE PILAR 1700 MM X 13600 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 8,0					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO} / \Delta\sigma_C$
0,8%	-3,07E-04	-9,34E-04	-1,24E-03	-1,41E-01	114,04
1,6%	-5,66E-04	-1,01E-03	-1,57E-03	-1,38E-01	87,40
2,4%	-7,88E-04	-1,08E-03	-1,87E-03	-1,34E-01	71,72
3,2%	-9,80E-04	-1,16E-03	-2,14E-03	-1,31E-01	61,33
4,0%	-1,15E-03	-1,23E-03	-2,38E-03	-1,28E-01	53,90
8,0%	-1,75E-03	-1,61E-03	-3,36E-03	-1,17E-01	34,93

TABELA 23

FAMÍLIA DE PILAR 1700 MM X 15300 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 9,0					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO} / \Delta\sigma_C$
0,8%	-3,04E-04	-8,30E-04	-1,13E-03	-1,29E-01	114,04
1,6%	-5,60E-04	-8,97E-04	-1,46E-03	-1,26E-01	86,19
2,4%	-7,80E-04	-9,63E-04	-1,74E-03	-1,22E-01	70,15
3,2%	-9,70E-04	-1,03E-03	-2,00E-03	-1,19E-01	59,66
4,0%	-1,14E-03	-1,10E-03	-2,23E-03	-1,17E-01	52,24
8,0%	-1,73E-03	-1,43E-03	-3,16E-03	-1,06E-01	33,57

TABELA 24

FAMÍLIA DE PILAR 1700 MM X 17000 MM

Tensões em kN/mm ² t = 10.000 dias E*ref = 18,33 GPa C = 10,0					
ρ	$\Delta\sigma_{C(\text{retração})}$	$\Delta\sigma_{C(\text{fluência})}$	$\Delta\sigma_{C(R+F)}$	$\Delta\sigma_{AÇO(R+F)}$	Rel $\Delta\sigma_{AÇO} / \Delta\sigma_C$
0,8%	-3,04E-04	-7,47E-04	-1,05E-03	-1,20E-01	114,04
1,6%	-5,60E-04	-8,07E-04	-1,37E-03	-1,16E-01	84,98
2,4%	-7,80E-04	-8,67E-04	-1,65E-03	-1,13E-01	68,60
3,2%	-9,70E-04	-9,27E-04	-1,90E-03	-1,10E-01	58,04
4,0%	-1,14E-03	-9,87E-04	-2,12E-03	-1,08E-01	50,63
8,0%	-1,73E-03	-1,29E-03	-3,02E-03	-9,73E-02	32,25