

In Situ Measurement of Stress Losses in Unbonded Tendons of Post Tensioned Flat Slabs

Avaliação “in loco” das perdas de protensão de cordoalhas engraxadas em lajes planas



S. J. SOARES ^a
sandro@paranasa.com.br

J. M. CALIXTO ^b
calixto@dees.ufmg.br

H. CHUMBINHO ^c
misa@misaengenharia.com.br

Abstract

This paper presents the results of “in situ” measurements of stress losses in unbonded tendons of post tensioned flat slabs. These flats slabs have approximately 350 m² in area and are 17 centimeter thick. They are part of a 16 story high hotel building. Load cells were employed to measure the forces in the tendons; they were placed in the vicinity of the active and the passive anchorages. The forces in the tendons were monitored from the time of their straining up to 170 days afterwards. The measurements reveal a frictional coefficient μ equal to 0.0528, a very close value to the one prescribed by NBR 6118 of 0.05. The stress loss due to the anchorage of the tendons was of 5.17% of the initial stress. The results indicate also that the remaining force near the passive anchorage is larger in relation to the value measured in the vicinity of the active one. The total stress loss measured so far (170 days) corresponds to 14 % of the initial post-tensioning stress.

Keywords: post-tensioning flat slabs, unbonded tendons, stress losses.

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo sobre as perdas de protensão, medidas “in loco”, de cordoalhas engraxadas em lajes planas. Essas lajes planas, com 17 centímetros de espessura e 350 m² de área, fazem parte de um edifício para fins hoteleiros de 16 pavimentos. As forças de protensão foram medidas por células de carga colocadas nas proximidades da ancoragem ativa e da ancoragem passiva. As medidas de forças foram feitas desde a protensão até idades de 170 dias após esse instante. Os resultados revelam um coeficiente de atrito μ igual a 0,0528 bastante próximo ao valor apresentado pela norma brasileira NBR 6118: 0,05. Nas perdas pela acomodação da ancoragem os valores apurados foram bastante similares e em termos médios, essa perda correspondeu a 5,17% da força inicial de protensão. Os valores de força medidos mostram também que a perda de tensão na cordoalha, próximo à ancoragem passiva, é menor em relação à perda na ancoragem ativa. Até a idade de 170 dias, verificou-se uma perda média de 14% da força inicial de protensão.

Palavras-chave: concreto protendido, lajes planas, cordoalhas engraxadas, perdas de protensão.

^a Paranasa Engenharia e Comércio S. A., sandro@paranasa.com.br, Rua Professor Magalhães Drumond 218 – 30350-000.- Belo Horizonte, MG, Brazil.

^b Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, calixto@dees.ufmg.br, Av. do Contorno 842 - 2° andar, 30110-060 - Belo Horizonte, MG, Brazil.

^c Misa Engenharia de Estruturas Ltda., misa@misaengenharia.com.br, Rua Roma 31 – 30360-680 - Belo Horizonte, MG, Brazil.

1. Introdução

Edifícios de lajes lisas protendidas com cordoalhas não aderentes são projetados e construídos nos Estados Unidos desde a década de 1950. Inicialmente, os cabos eram engraxados e envoltos em papel. Posteriormente desenvolveu-se uma proteção anticorrosiva formada por um tubo de polietileno de alta densidade associada a uma graxa especial que envolve a cordoalha (cordoalha engraxada e plastificada). No Brasil, segundo Loureiro [1], a técnica de protensão com cordoalhas engraxadas foi iniciada em 1997, com a fabricação destas pela Belgo Bekaert Arames S. A. Desde então, esta nova tecnologia vem tendo grande utilização. A introdução deste sistema de protensão leve tira partido principalmente do uso de lajes lisas sem vigas, ou pelo menos, com o mínimo de utilização das mesmas. Esta forma de projetar tem como objetivo simplificar de sobremaneira a execução das fôrmas da estrutura, resultando em economia de consumo de material e de mão de obra na construção. Facilita-se também a montagem das armaduras e o lançamento do concreto, que na execução das vigas é mais demorado e trabalhoso, devido às interferências das armaduras das próprias vigas com os pilares. Essas lajes lisas protendidas

apresentam altura reduzida e permitem uma grande flexibilidade quer na distribuição de tubulações e dutos, quer na disposição das paredes divisórias sendo, portanto, indicadas tanto para edifícios comerciais quanto residenciais.

As cordoalhas engraxadas são comumente utilizadas com a metodologia de pós-tração como a adotada neste estudo. O processo da pós-tração em lajes lisas promove uma avaliação antecipada da resistência da laje visto que as maiores tensões introduzidas na laje ocorrem no instante de aplicação da força de protensão. Geralmente esta operação é realizada quando o concreto tem ainda pouca idade e não possui ainda, portanto, toda a resistência para o qual foi projetado. Sendo assim, a operação de protensão constitui uma espécie de prova de carga nestas lajes.

Dentro deste cenário, o objetivo principal deste artigo é apresentar os resultados de um estudo, realizado por Soares [2], sobre as perdas de força de protensão, medidas "in loco", de cordoalhas engraxadas em lajes lisas protendidas de um edifício, para fins hoteleiros, em construção na região metropolitana de Belo Horizonte. Medidas de forças em cordoalhas, nas proximidades da ancoragem ativa e da passiva, foram feitas desde o instante da protensão até idades de 170 dias após esta data. O artigo apresenta também um estudo comparativo dos valores das perdas de força medidos com os prescritos pela NBR 6118 [3] e encontrados na literatura.

Vale frisar que, no Brasil, não existe nenhum processo normativo e nem é comum avaliar ou verificar as perdas de protensão "in loco" ao longo do tempo. É neste sentido que o presente trabalho vem contribuir.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Características das lajes analisadas

Para a avaliação das perdas de tensão nas cordoalhas, foi escolhido um edifício para fins hoteleiros localizado na cidade de Belo Horizonte. A edificação é composta de 16 pavimentos, sendo o primeiro pavimento (térreo) para recepção e área administrativa; os próximos 3 andares, pavimentos de garagem; do quinto ao décimo quinto (11 andares), pavimentos tipo e o último andar (16º pavimento) é destinado à área técnica. A figura 1 apresenta a fachada principal da edificação.

Todas as lajes do edifício são protendidas com cordoalhas não aderentes. As três primeiras lajes são nervuradas e não foram analisadas neste trabalho. As demais lajes são lisas sendo que as do 10º ao 15º pavimento correspondem às lajes monitoradas neste trabalho. Essas lajes lisas possuem 17 cm de espessura. A planta de fôrma do pavimento tipo pode ser vista na figura 2. As paredes externas de vedação são de tijolo cerâmico com espessura de 12 cm e as internas em gesso acartonado ("dry wall").

Foram realizadas medições numa mesma cordoalha (cabo 2A) das lajes do pavimento tipo (do 10º ao 15º andar) da edificação em estudo. Para instalação do equipamento de medição de força, nichos, com dimensões em planta de 30 x 100 cm, foram deixados nas lajes. Estes nichos foram localizados nas proximidades da ancoragem ativa e da ancoragem passiva. A figura 3 ilustra a posição da cordoalha instrumentada bem como a posição destes nichos, enquanto que a figura 4 mostra o perfil desta cordoalha.

Figura 1 - Fachada principal da edificação



A força de protensão especificada em projeto para o cabo 2A foi de 140 kN. O alongamento desta cordoalha pós-cravação da cunha, também especificado pelo projetista, foi de 130 mm. É importante frisar que a cordoalha escolhida foi, em geral, a última a ser tracionada em cada laje quando da operação de protensão. Desta forma não ocorreu perda devida à cravação sucessiva de cabos na cordoalha instrumentada.

2.2 Concreto das lajes

O traço do concreto empregado nas lajes foi estudado com o intuito de se obter na data de protensão uma resistência caracterís-

tica à compressão da ordem de 80% do valor característico de 28 dias. O concreto especificado tinha uma resistência característica à compressão f_{ck} aos 28 dias igual a 30 MPa. Na sua fabricação foi utilizado cimento CP V ARI Plus num teor de 356 kg/m³. A relação água/cimento foi igual a 0,55. Para se ter a trabalhabilidade necessária foi empregado um aditivo plastificante TEC MULT 444 produzido pela RHEOTEC. Inicialmente foram realizados ensaios de resistência à compressão do concreto em diversas idades. Os resultados destes ensaios mostraram que a resistência característica à compressão aos 7 dias era bastante próxima do valor procurado e que esta idade também atendia bem o cronograma de obra. Portanto, a idade escolhida para protensão das cordoalhas foi em

Figura 2 - Planta de fôrma do pavimento tipo

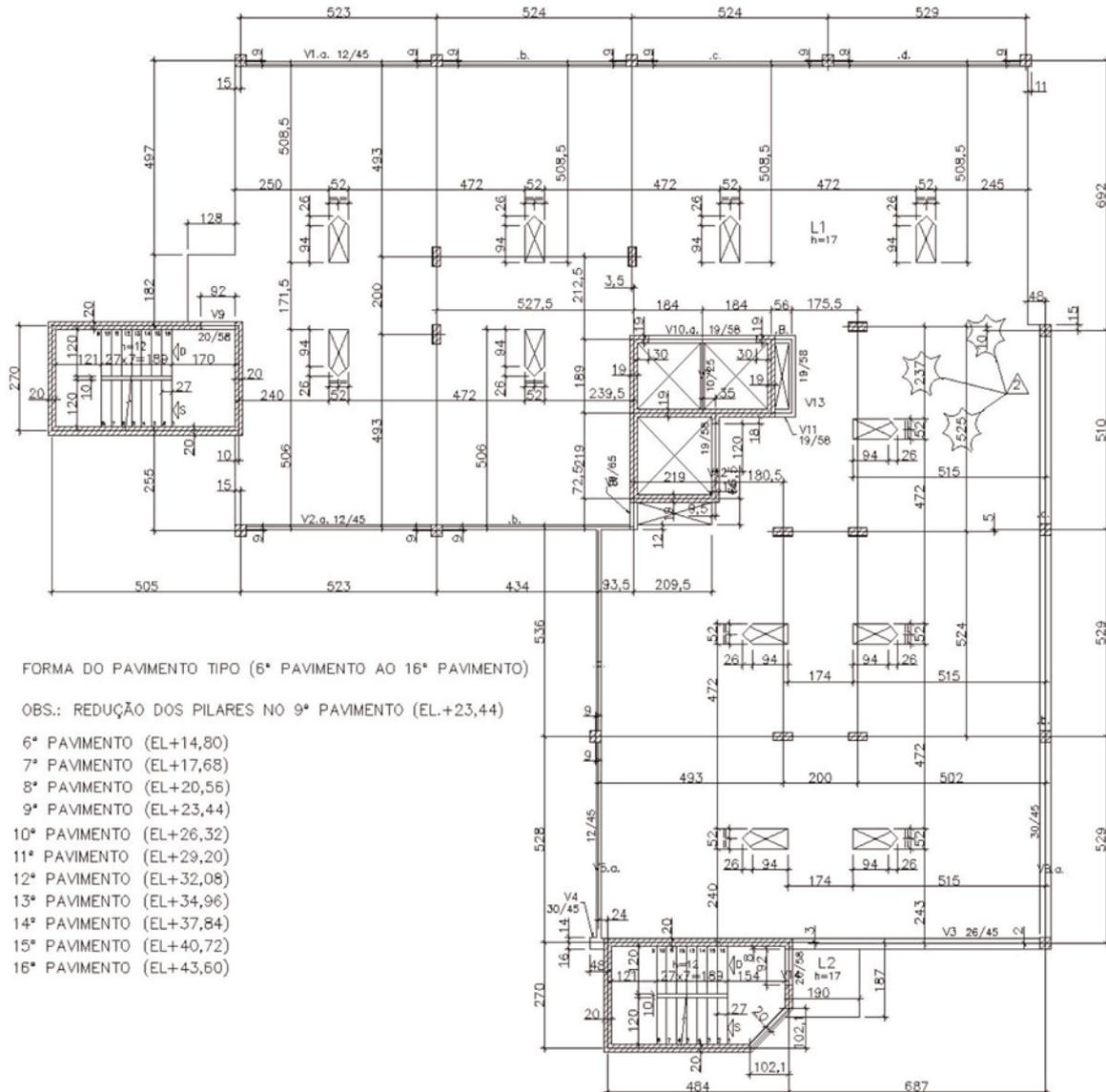


Figura 4 - Detalhe do perfil do cabo 2A

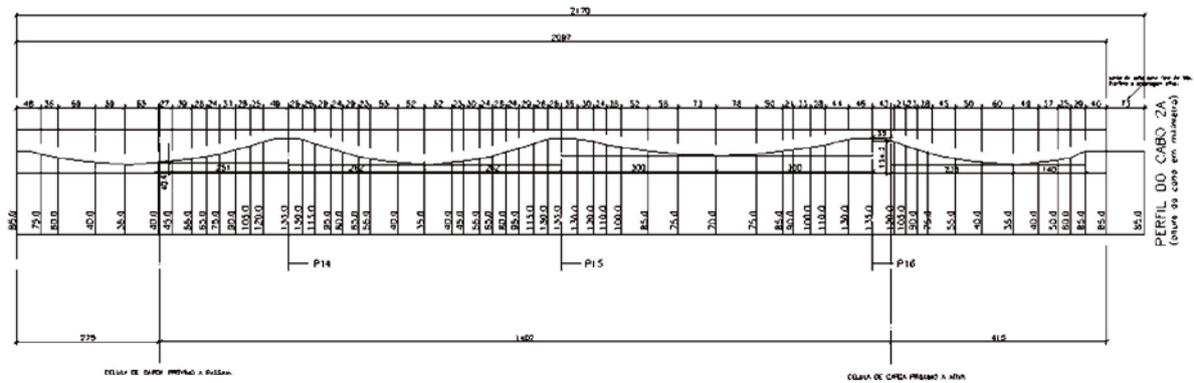


Figura 5 - Indicador interligado à célula de carga posicionada na cordoalha



Tabela 1 – Perdas imediatas de força no instante de estiramento do cabo devido ao atrito

Pavimento	Força nas proximidades da ancoragem ativa (kN)	Força nas proximidades da ancoragem passiva (kN)	Diferença de Força (kN)	Coefficiente de atrito μ (1/radiano)
10	136,20	129,95	6,25	0,0910
11	143,85	142,25	1,60	0,0217
12	143,75	140,35	3,40	0,0464
13	141,55	140,50	1,05	0,0144
14	137,20	131,20	6,00	0,0866
15	138,75	134,75	4,00	0,0566
Valor médio	140,22	136,50	3,72	0,0528

desta força. Em seguida tracionava-se a cordoalha com a força inicial de protensão e iniciavam-se os procedimentos de medida de força. Além desta medida, leituras de carga foram feitas no instante de despressurização do macaco e de cravação das cunhas bem como em várias idades após este momento. Essas idades foram até 14 dias (366 horas) no cabo 2A das lajes do 10º ao 14º pavimento e até aproximadamente 170 dias (4086 horas) neste mesmo cabo da laje do 15º pavimento.

3. Apresentação e análise dos resultados

3.1 Perdas imediatas por atrito

As perdas por atrito são desenvolvidas ao longo do cabo quando do seu estiramento para produzir a força de protensão. A tabela 1 apresenta os resultados das forças medidas na cordoalha, nas

proximidades da ancoragem passiva e da ancoragem ativa, no instante de aplicação da força de protensão para cada uma das lajes analisadas. A diferença entre essas forças representa a perda de força devida ao atrito. A análise dos resultados revela primeiramente valores bastante distintos para a perda de força devida ao atrito. Possíveis alterações no perfil da cordoalha durante as operações de concretagem das lajes pode ser um dos fatores que explica essa diferença nos valores medidos.

A NBR 6118 [3] apresenta em seu capítulo 9 uma equação para avaliação da perda imediata de protensão devida ao atrito em elementos estruturais com pós-tração. A equação é dada por:

$$\Delta P_{(x)} = P_i \cdot \left[1 - e^{- (\mu \Sigma \alpha + kx)} \right] \quad (1)$$

Tabela 2 – Carga estimada no atuador hidráulico no instante da protensão

Pavimento	Força nas proximidades da ancoragem ativa no instante da protensão (kN)	Coefficiente de atrito μ (1/radiano)	Força estimada de protensão no atuador hidráulico (kN)	Força de protensão de projeto (kN)
10	136,20	0,0910	138,50	
11	143,85	0,0217	144,40	
12	143,75	0,0464	144,95	
13	141,55	0,0144	141,90	140,00
14	137,20	0,0866	139,40	
15	138,75	0,0566	140,15	
Valor médio	140,20	0,0528	141,55	

Tabela 3 – Perdas imediatas de força nas cordoalhas por acomodação das ancoragens

Pavimento	PRÓXIMO À ANCORAGEM ATIVA				
	Força inicial de protensão (kN)	Força pós-cravação da cunha (kN)	Perda de força (kN)	Percentual de perda de força (%)	Retorno do cabo (mm)
10	136,20	128,40	7,80	5,73%	3,70
11	143,85	135,90	7,95	5,53%	3,33
12	143,75	135,00	8,75	6,09%	2,93
13	141,55	137,50	4,05	2,86%	1,59
14	137,20	129,60	7,60	5,54%	3,62
15	138,75	131,40	7,35	5,30%	4,10
Valor médio	140,20	132,95	7,25	5,17%	3,21

onde,

P_i é a força inicial de protensão;

x é a distancia, em metros, entre os pontos de medida para cálculo de ΔP ;

$\Sigma\alpha$ é a soma dos ângulos de desvio entre os pontos de medida, em radianos;

μ é o coeficiente de atrito aparente entre a cordoalha e a bainha de polietileno de alta densidade (valor em 1/radianos); e

k é o coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo. Na falta de dados experimentais, a norma indica que pode ser adotado o valor de 0,01 μ .

O fabricante da cordoalha (Belgo [4]) especifica um valor para o coeficiente de atrito aparente μ entre 0,06 e 0,07. A norma brasileira NBR 6118 [3] especifica ainda que, na falta de dados experimentais, esse coeficiente de atrito aparente pode ser tomado igual a 0,05.

A tabela 1 mostra também o coeficiente de atrito aparente μ calculado com base na equação 1. Para a determinação desse coeficiente de atrito adotou-se para o coeficiente k , de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo, o valor igual a 0,01 μ . Empregou-se o valor de 14,07 metros para a distância entre os pontos de medida de força e 0,3757 radianos para a soma dos ângulos de desvio do cabo ($\Sigma\alpha$). Em termos médios, o coefi-

Tabela 4 – Análise comparativa do alongamento dos cabos

Pavimento	Força estimada de protensão no atuador hidráulico (kN)	Perda de força devido à acomodação da ancoragem (kN)	Força estimada na ancoragem ativa pós-cravação das cunhas (kN)	Alongamento estimado em função das forças medidas (mm)	Alongamento especificado em projeto (mm)	Alongamento real (mm)	Diferença do alongamento real em relação ao alongamento de projeto (%)	Diferença do alongamento real em relação ao alongamento estimado (%)
10	138,50	7,80	130,70	133,34	130,00	136,00	4,41 %	1,95 %
11	144,40	7,95	136,45	139,21	130,00	133,00	2,26 %	-4,67 %
12	144,95	8,75	136,20	138,96	130,00	130,00	0,00 %	-6,89 %
13	141,90	4,05	137,85	140,64	130,00	131,00	0,76 %	-7,36 %
14	139,40	7,60	131,80	134,47	130,00	128,00	-1,56 %	-5,05 %
15	140,15	7,35	132,80	135,49	130,00	130,00	0,00 %	-4,22 %
Valor médio	141,55	7,25	134,30	137,02	130,00	131,33	--	--

ciente de atrito μ calculado apresentou valor menor que o máximo especificado pelo fabricante da cordoalha de 0,07. Com relação à norma brasileira NBR 6118, praticamente não houve diferença: 0,0528 versus 0,05.

A tabela 2 apresenta uma comparação entre força de protensão de projeto em relação à força estimada com base na leitura da célula de carga na proximidade da ancoragem ativa. Para o cálculo desta força estimada, novamente utilizou-se a equação 1, adotando-se para coeficiente de atrito μ , o valor determinado acima para cada pavimento, e para o coeficiente k , de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo, o valor igual a $0,01 \mu$. Empregou-se o valor de 4,15 metros para a distância entre os pontos de medida de força e 0,1471 radianos para a soma dos ângulos de desvio do cabo ($\Sigma\alpha$). A análise dos resultados mostrados na tabela 2 revela um valor médio para a carga estimada de protensão no atuador hidráulico bastante próximo à carga especificada no projeto.

3.2 Perdas imediatas por acomodação das ancoragens

A tabela 3 apresenta os resultados das forças medidas na cordoalha, nas proximidades da ancoragem ativa, no instante de aplicação da força de protensão e logo após a cravação das cunhas. A diferença entre essas forças representa a perda imediata de força por acomodação da ancoragem. A tabela apresenta também o percentual desta perda de força bem como o comprimento de retorno do cabo. Este comprimento de retorno foi calculado como demonstrado no apêndice A.

A análise dos resultados revela primeiramente valores similares para a perda imediata de força. Em apenas um caso (pavimento 13) o valor medido foi significativamente menor. Em termos médios, a perda imediata de força na cordoalha correspondeu a 5,17% da força inicial de protensão. Este valor corresponde ao normalmente prescrito na literatura para esta perda (Lyn e Burns [5]). O retorno do cabo devido à perda imediata apresentou um valor médio de

aproximadamente 3,21 mm, significativamente menor que 7 mm prescrito pelo fabricante da cordoalha (Cauduro [6]).

Com base nos valores da força estimada de protensão no atuador hidráulico (tabela 2) e das perdas de força nas cordoalhas apresentadas na tabela 3, resolveu-se avaliar a força resultante de protensão na ancoragem ativa após a cravação das cunhas. Essa força resultante foi calculada como sendo diferença entre as duas anteriores e está apresentada na tabela 4. Com base nesta força resultante pode-se avaliar o alongamento da cordoalha após a acomodação das ancoragens. Este alongamento foi calculado considerando-se novamente um comprimento inicial da cordoalha de 21,00 metros, uma área da cordoalha de $1,01 \text{ cm}^2$ e um valor de 204 GPa para o módulo de elasticidade do aço. A tabela 4 mostra a comparação deste alongamento com o especificado em projeto e com o real medido pela empresa de protensão. A análise destes resultados revela que as diferenças dos alongamentos, quando comparados com os valores medidos "in loco", estão dentro do intervalo de $\pm 10 \%$. De acordo com a NBR 14931 [7], cabos cujos alongamentos estejam dentro do intervalo de $\pm 10 \%$ dos valores previstos podem ser liberados.

3.3 Perdas progressivas de força nas cordoalhas

Um estudo comparativo da força média remanescente na cordoalha, nas proximidades da ancoragem ativa e da passiva, após a cravação das cunhas para as diversas lajes analisadas (10° ao 15° pavimento) pode ser visto na tabela 5 e figura 6. A análise da tabela e da figura revela inicialmente maiores valores de força nas proximidades da ancoragem passiva. A figura mostra que também a diferença entre as forças medidas se mantém basicamente constante até a idade de 336 horas (14 dias) após a protensão: 0,65 kN em média. Nesta idade, a força média remanescente na cordoalha nas proximidades da ancoragem ativa é igual a 125,45 kN, o que corresponde a uma perda de carga total de 10,52 % em relação à força inicial de protensão média igual a 140,20 kN. Nas proximidades da ancoragem passiva a

Tabela 5 – Forças remanescentes médias nas cordoalhas – (10° ao 15° pavimento)

Tempo	Próximo à ancoragem ativa (kN)	Próximo à ancoragem passiva (kN)	Diferença de força (kN)
No instante após a cravação das cunhas	132,95	133,70	0,75
48 horas após	131,20	132,20	1,00
72 horas após	130,95	131,55	0,60
144 horas após	128,60	129,35	0,75
200 horas após	126,75	127,20	0,45
336 horas após	125,45	125,80	0,35
Valor médio	-----	-----	0,65

Figura 6 - Força remanescente média nas cordoalhas após a cravação das cunhas.
(10° ao 15° pavimento)

Força de Protensão Remanescente na Cordoalha após a Cravação das Cunhas

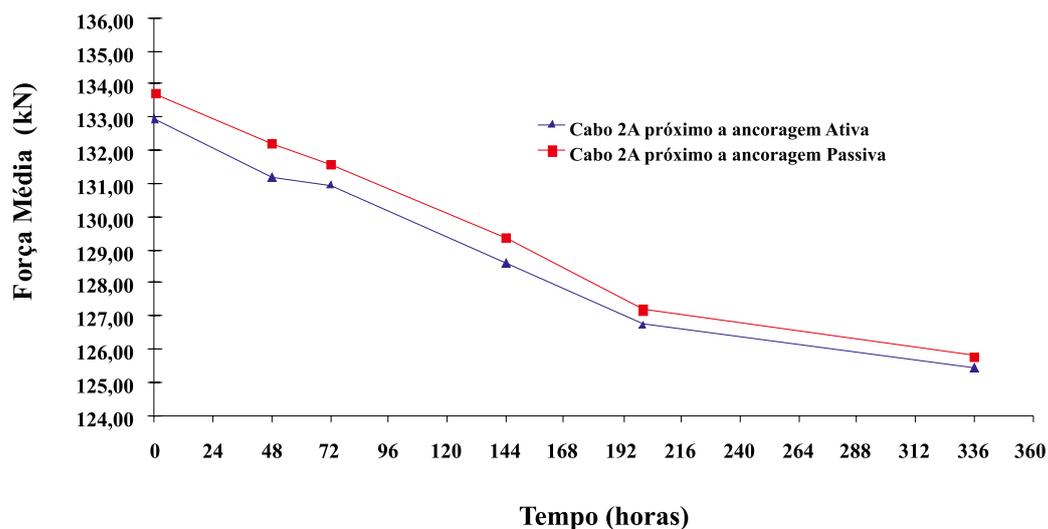
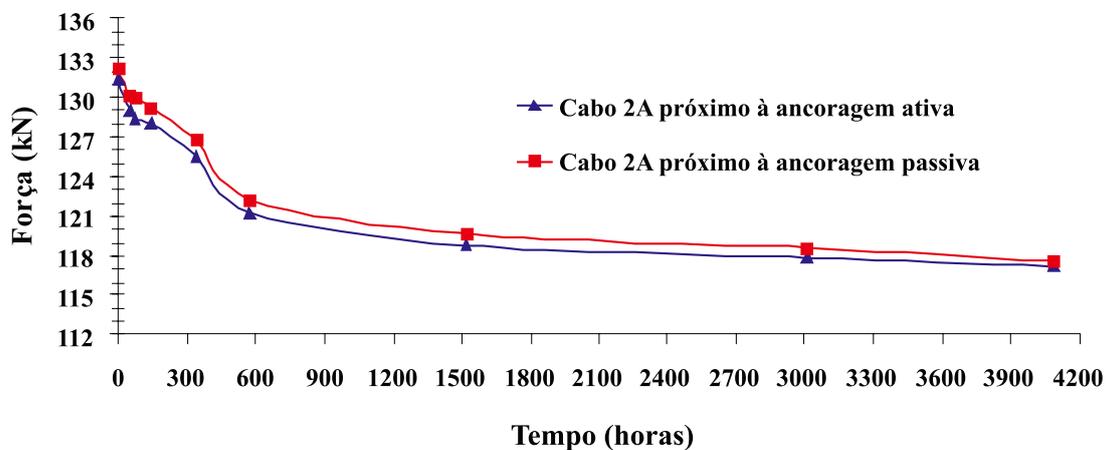


Figura 7 - Força remanescente na cordoalha após a cravação das cunhas - (15° pavimento)

Força Remanescente de Protensão na Cordoalha após a Cravação das Cunhas 15° Pavimento



força média remanescente na cordoalha é de 125,80 KN, o que corresponde a uma perda de carga total de 8,04% em relação à força inicial de protensão média igual a 136,80 KN. Um outro estudo comparativo da força remanescente na cordoalha pós-cravação da cunha, nas proximidades da ancoragem ativa e da passiva, para a laje do 15º pavimento pode ser visto na figura 7. A análise da figura revela também maiores valores de força nas proximidades da ancoragem passiva. A figura também mostra que a diferença entre as forças medidas diminuiu até a idade de 4086 horas (≅ 170 dias) após a protensão: 0,45 kN. Nesta idade, a força remanescente na cordoalha nas proximidades da ancoragem ativa é igual a 117,15 KN, o que corresponde a uma perda de carga total de 15,06 % em relação à força inicial de protensão igual a 138,70 KN. Nas proximidades da ancoragem passiva a força média remanescente na cordoalha é de 117,60 KN, o que corresponde a uma perda de carga total de 12,72% em relação à força inicial de protensão igual a 134,75 KN.

A perda total da força de protensão comumente considerada em projeto, para o tempo infinito, é da ordem de 20 % do valor da força inicial. Pelos valores medidos pode-se observar que aproximadamente 14 % em média da força inicial de protensão já foram perdidos até 170 dias após a execução da protensão. Este resultado não nos permite inferir se a perda total no tempo infinito será maior ou menor que 20 % da tensão inicial de protensão comumente empregado em projeto. Para isto medidas de força num tempo significativamente maior são necessárias.

4. Conclusões

Este estudo teve como objetivo avaliar as perdas de tensão, medidas “in loco”, de cordoalhas engraxadas e plastificadas em lajes planas. Essas lajes planas, com 17 centímetros de espessura e 350 m² de área, correspondem a lajes do pavimento tipo (10º ao 15º pavimento) de um edifício localizado em Belo Horizonte. Em cada laje, a cordoalha analisada foi sempre à última a ser tencionada. As forças de protensão nas cordoalhas foram medidas por células de carga colocadas nas proximidades da ancoragem ativa e da ancoragem passiva. Em função da metodologia construtiva do edifício, as medidas de forças foram feitas desde a protensão até idades de 170 dias após esse instante. As principais conclusões do estudo são:

- Valores bastante distintos foram medidos para a perda de força devida ao atrito. Possíveis alterações no perfil da cordoalha durante as operações de concretagem das lajes pode ser um dos fatores que explica estes valores. Com base nas medidas obteve-se o valor médio para o coeficiente de atrito μ de 0,0528; esse valor é menor que o máximo especificado pelo fabricante da cordoalha de 0,07, porém bastante próximo ao valor apresentado pela norma brasileira NBR 6118: 0,05.
- Os valores encontrados para as perdas por acomodação da ancoragem foram bastante similares. Em termos médios, essa perda imediata correspondeu a 5,17% da força inicial de protensão.
- A avaliação do retorno médio do cabo, devido à cravação das cunhas, revelou um valor de 3,21 mm, significativamente menor que 7 mm prescrito pelo fabricante da cordoalha.
- Até a idade de 14 dias, uma perda total média (10º ao 15º pavimento) de 9,25 % da força inicial de protensão foi verificada.

- Observou-se que aproximadamente 14 % da força inicial de protensão foi perdida até 170 dias após a execução (15º pavimento).
- Os resultados mostraram também maiores valores de força remanescente nas cordoalhas nas proximidades da ancoragem passiva em relação à ancoragem ativa.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a IMPACTO PROTENSÃO, a BELGO BEKAERT S. A. e a PARANASA S. A. pelo apoio financeiro.

6. Referências bibliográficas

- [01] LOUREIRO, G. J., Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas, VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2006.
- [02] SOARES, S. J. Avaliação “in Loco” das Perdas de Carga de Cordoalhas Engraxadas em Lajes Lisas, Belo Horizonte, 2005, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 64 p.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento - NBR 6118, Rio de Janeiro, 2003, 221 p.
- [04] BELGO BEKAERT ARAMES S. A., Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido, Catálogo Técnico, [http:// www.belgo.com.br](http://www.belgo.com.br).
- [05] LYN, T. Y. e BURNS, N., Design of Prestressed Concrete Structures, John Wiley & Sons, 3ª edição, 1981, 646 p.
- [06] CAUDURO, E. L., Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas, 2ª edição, 2002, 109 p.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Execução de Estruturas de Concreto – Procedimento, NBR 14931, Rio de Janeiro, 2003, 40 p.
- [08] COLLINS M. P., e MITCHELL, D., Prestressed Concrete Basics, Canadian Prestressed Concrete Institute, 1ª edição, 1987, 614 p.

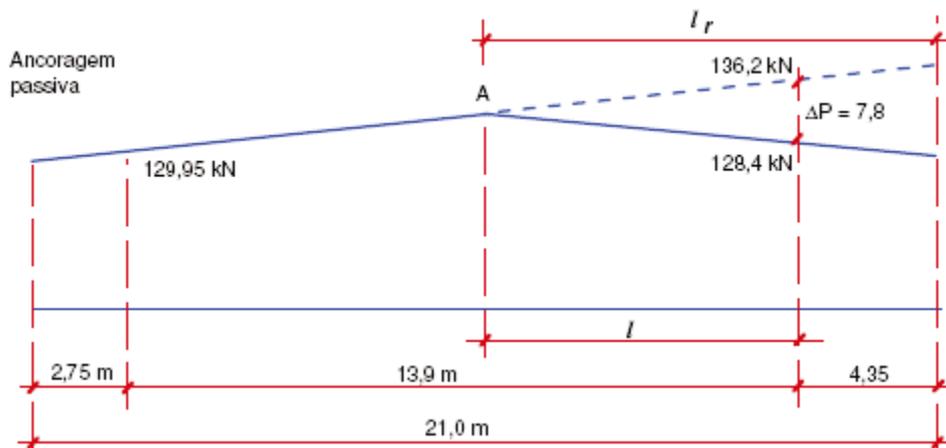
Apêndice A – Cálculo do retorno dos cabos

O cálculo do retorno dos cabos após a cravação das cunhas foi feito com base na linearização da equação 1 conforme sugerido por Collins e Mitchell [8]. Deste modo aquela equação assume a forma:

$$P_{(x)} = P_i \cdot (1 - \mu \sum \alpha - kx) \quad (2)$$

A distribuição da força $P(x)$ ao longo do cabo do 10° pavimento é dada por:

Figura 8 - Distribuição de força no cabo 2A pós-cravação das cunhas - (10° pavimento)



Na figura o comprimento l é dado por:

$$l = \frac{\Delta P}{2p}, \text{ sendo } p = \frac{136,2 - 129,95}{13,9} = 0,45 \text{ kN/m e, portanto,}$$

$$l = \frac{7,8}{2 \cdot 0,45} = 8,67 \text{ m.}$$

O comprimento total l_r afetado pelo retorno do cabo é igual a $13,02 \text{ m}$ ($8,67 + 4,35$). Com isso o valor do retorno do cabo, considerando a área da seção transversal da cordoalha de $1,01 \text{ cm}^2$ e um módulo de elasticidade do aço de 204 GPa , é dado por:

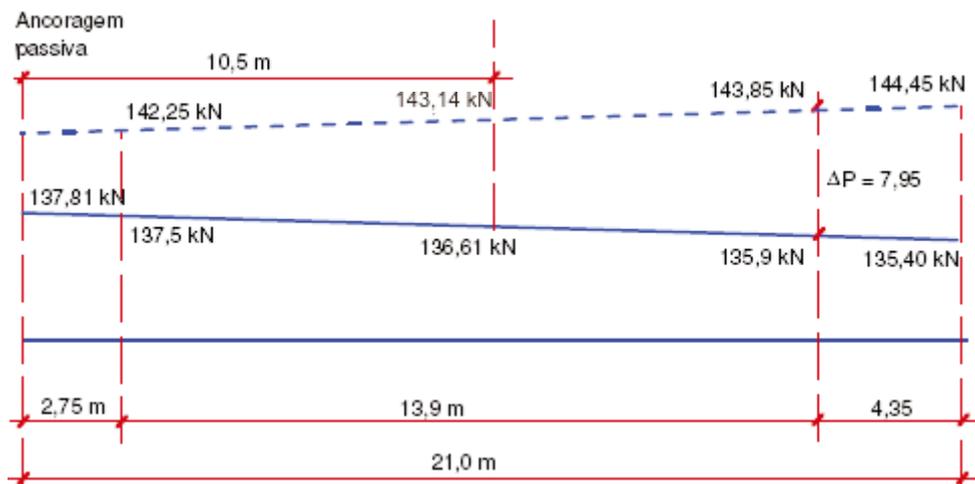
$$\delta = \frac{pl_r^2}{A_p E_p} = \frac{0,00045 \cdot 13020^2}{1,01 \cdot 20400} = 3,7 \text{ mm}$$

Nos cabos do 14° e 15° pavimentos, o procedimento adotado foi o mesmo e os valores obtidos iguais a 3,62 e 4,10 mm respectivamente.

Para os demais pavimentos, o cálculo com este procedimento levou a valores do comprimento l maior que 16,65 m (13,9 + 2,75), indicando que todo o cabo foi afetado pelo retorno. Nestes casos, o procedimento, tomando como exemplo o cabo do 11° pavimento, passou a ser o indicado a seguir.

$$p = \frac{143.85 - 142.25}{13.9} = 0.115 \text{ kN}$$

Figura 9 - Distribuição de força no cabo 2A pós-cravação das cunhas - (11° pavimento)



$$\delta = \frac{\Delta P_{\text{médio}} l_r}{A_p E_p} = \frac{\left(\frac{143.14 - 136.61}{2} \right) \cdot 21000}{1.01 \cdot 20400} = 3.33 \text{ mm}$$

Nos cabos do 12° e 13° pavimentos, o procedimento adotado foi o mesmo acima e os valores obtidos iguais a 2,93 e 1,59 mm respectivamente.