

INFLUÊNCIA DA PRÉ-COMPRESSÃO EM PROJETOS DE LAJES PLANAS PROTENDIDAS

Luiz Alberto Duarte Filho, MSc.¹ / Maurício Sgarbi, MSc.² / Fábio Albino de Souza, MSc.³

¹ Professor da Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI / duarte@univali.br

² Professor da Universidade Federal Fluminense - UFF / mauricio.sgarbi@gmail.com

³ Professor, Pós-graduação Elementos Protendidos/ IDD / fabio@ebpx.com.br

Resumo

No presente trabalho é avaliada a influência da pré-compressão no projeto de lajes planas protendidas. A NBR 6118:2014 exige que seja considerada uma pré-compressão mínima de 1 MPa e armaduras passivas mínimas (positivas e negativas) em lajes planas protendidas. Algumas normas internacionais não prescrevem esta pré-compressão mínima, ou quando exigem, como no caso do ACI 318, permitem que a armadura passiva seja suprimida em alguns trechos. A abordagem mais atual sobre o assunto considera que a pré-compressão mínima não é garantia de um bom comportamento em serviço, e sim o conjunto formado pelas armaduras ativas e passivas, em quantidades e distribuições adequadas (AALAMI, 2014). Sendo assim, para avaliar a importância da pré-compressão mínima, foram analisados dois projetos de lajes planas maciças, por meio dos programas TQS e ADAPT. Nos dois projetos foi variado o nível de protensão, adotando-se, em alguns casos, pré-compressão inferior ao valor mínimo exigido pela NBR 6118:2014. Com estes níveis de protensão reduzidos, obtiveram-se projetos mais econômicos e com bom comportamento em serviço. Em muitas situações foi possível atender ao ELS-F para combinação frequente com valores de pré-compressão inferiores ao mínimo de norma. Com os resultados apresentados pode-se concluir que é possível desenvolver projetos mais econômicos, com adequado nível de segurança e bom comportamento em serviço, com pré-compressão inferior a 1,0 MPa, viabilizando assim o sistema protendido para vãos menores. Acredita-se ser mais coerente não existir a prescrição de pré-compressão mínima na norma, pois a NBR 6118:2014 já estabelece armaduras passivas mínimas para momentos positivos e negativos.

Palavras chaves: Laje protendida; pré-compressão mínima; lajes planas.

Abstract

In the present work, the influence of precompression on the design of prestressed flat slabs is evaluated. NBR 6118:2014 demands a minimum pre-compression of 1 MPa and minimum passive reinforcement (positive and negative) on prestressed flat slabs. Some international codes do not prescribe this minimum pre-compression, or when required, as in the case of ACI 318, allow passive reinforcement to be suppressed in some sections. The most current approach on the subject considers that the minimum pre-compression is not a guarantee of good behavior in service, but the entirety of prestressing and non-prestressed reinforcement, in amount and distribution (AALAMI, 2014). Thus, to assess the importance of minimum pre-compression, two flat slab designs were analyzed using the TQS and ADAPT programs. In both projects the level of prestressing varied, adopting, in some cases, pre-compression lower than the minimum required by NBR 6118:2014. With these reduced prestressing levels, more economical projects, with good service behavior, were obtained. In many situations it has been possible to meet the ELS-F for frequent combination with pre-compression values below than 1 MPa. With the results presented it can be concluded that it is possible to develop more economical projects, with adequate safety level and good behavior in service, with pre-compression less than 1.0 MPa, thus enabling the prestressed system for smaller spans. It is believed that the minimum pre-compression requirement should be removed in the code, as NBR 6118:2014 already establishes minimum passive reinforcement for positive and negative moments

Keywords: Post-Tensioned Slab; Average Minimum Precompression; Flat Slabs.

Introdução

A norma NBR 6118:2014 (item 20.3.2.1) prescreve que, para projetos de lajes planas protendidas, deve-se respeitar uma compressão média igual ou superior a 1 MPa, na seção da laje correspondente ao cabo ou feixe de cabos. Além disso, a NBR 6118:2014 também exige que se adote armadura passiva mínima para as armaduras positivas e negativas em lajes protendidas.

O ACI 318, diferentemente da norma brasileira, possibilita que seja suprimida a armadura passiva mínima em algumas situações, dependendo se a protensão é aderente ou não. Por isso, como forma de garantir um comportamento satisfatório em serviço, no caso de ausência de armadura passiva, o mesmo estabelece uma pré-compressão mínima de 0,86 MPa.

Entretanto, esta exigência da pré-compressão mínima vai contra a abordagem mais atual para o projeto de estruturas de concreto, na qual não existe uma separação entre as formulações para as peças protendidas e não-protendidas (concreto armado). Ambas devem ser projetadas seguindo os mesmos conceitos, de forma a apresentar bom comportamento em serviço e adequado nível de segurança, por meio de combinação entre armaduras ativas e passivas (AALAMI, 2014).

A justificativa que a pré-compressão melhora o comportamento em serviço e aumenta a resistência à punção em lajes planas não é suficiente para impor este limite, pois sendo assim não se poderia projetar lajes planas em concreto armado.

Esta consideração da intensidade da pré-compressão, ou até mesmo da ausência dela em uma das direções, pode ser fundamental para viabilizar financeiramente o uso da protensão em alguns projetos específicos de lajes planas.

Assim, no presente trabalho é analisada a viabilidade técnico-financeira do emprego de níveis de pré-compressão inferiores ao mínimo exigido pela NBR 6118:2014, em dois projetos de lajes planas protendidas, por meio dos programas TQS e ADAPT.

Pré-compressão mínima e armadura passiva mínima

A norma NBR 6118:2014 (item 20.3.2.1) prescreve que, para projetos de lajes planas protendidas, deve-se respeitar uma compressão média igual ou superior a 1 MPa, na seção da laje correspondente ao cabo ou feixe de cabos. A NBR 6118:2014 também exige que seja utilizada armadura passiva mínima nos momentos positivos e negativos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Valores mínimos de armadura passiva aderente, conforme a NBR 6118:2014. Adaptado pelo Autor

Armadura	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$	- para lajes apoiadas sobre vigas: $\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5\rho_p \geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$ - para lajes lisas ou cogumelo: $A_s \geq 0,00075 h \lambda$
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$	
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5\rho_p \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5\rho_p \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$	-

O ACI 318 também prescreve uma pré-compressão média mínima, a qual serve como parâmetro para determinação das armaduras ativas e passivas. Esta pré-compressão é uma forma de garantir um bom comportamento em serviço em lajes planas protendidas, pois o ACI 318 permite que estas lajes sejam projetadas sem armadura passiva mínima. Outras normas internacionais controlam o comportamento em serviço estabelecendo armadura passiva mínima ou critérios de controle de fissuração, e não estabelecem uma pré-compressão mínima (EC2: 2004; TR-43:2005).

Segundo Aalami (2014), alguns ensaios em lajes planas protendidas realizados no início da década de 70, nos Estados Unidos, tiveram um papel importante para as recomendações presentes atualmente no ACI 318. Estas lajes tiveram uma pré-compressão média de aproximadamente 0,86 MPa (125 psi). Este nível de pré-compressão mostrou efeitos benéficos no comportamento à punção das lajes, sendo então adicionado como prescrição ao ACI 318.

Entretanto, desde a década de 70 muito se pesquisou sobre o comportamento de lajes planas protendidas e o dimensionamento à punção. Então, a necessidade de uma pré-compressão média mínima para o projeto à punção é atualmente questionada, até porque o atual ACI 318 considera em sua formulação para dimensionamento à punção de lajes a possibilidade de que não exista pré-compressão, ou que esta seja inferior à mínima.

Segundo Aalami (2014), pode-se obter um projeto satisfatório para laje plana protendida com uma pré-compressão menor que a média de 0,86 MPa, desde que seja adicionada adequada armadura passiva. Ainda segundo o autor, não é o nível de pré-compressão que garante o bom comportamento em serviço e a segurança da laje, e sim o conjunto de armadura ativa e passiva, em quantidades e distribuição que garantam o desempenho satisfatório da mesma.

Assim, a exigência de uma pré-compressão mínima, na presença de adequada armadura, é dispensável.

Ao contrário de outras normas internacionais, no ACI tem-se prescrições diferentes dependendo se a estrutura é classificada como protendida ou armada (conventionally reinforced). Isto vai contra a abordagem mais atual para projeto de estruturas de concreto, na qual não existe uma separação entre as formulações para as peças protendidas e não-protendidas (concreto armado). Ambas devem ser projetadas seguindo os mesmos conceitos, de forma a apresentar bom comportamento em serviço e adequado nível de segurança, por meio de combinação entre armaduras ativas e passivas.

Diferente da NBR 6118:2014, o ACI 318 permite que lajes planas com protensão não aderente sejam projetadas sem armadura passiva positiva (armadura inferior). Para o caso de lajes com protensão aderente, o ACI dispensa a utilização de armadura passiva nas faces inferior e superior. A pré-compressão média estabelecida no ACI 318 serve para garantir a quantidade mínima de protensão na ausência de armadura passiva, as quais contribuiriam para reduzir a fissuração localizada (AALAMI, 2014).

A pré-compressão mínima estabelecida pelo ACI 318, em termos de resultante de força, equivale aproximadamente a uma taxa de 0,2% de armadura passiva para condições de serviço. Isto é um pouco mais do que a taxa mínima prescrita pelo ACI 318 (0,18%) para combater os efeitos da fluência e da retração em lajes de concreto armado (não protendidas). Assim, se além da armadura ativa existir armadura passiva, esta última pode reduzir ou até eliminar completamente a necessidade da pré-compressão mínima exigida pelo ACI 318 para controle da fissuração (AALAMI, 2014).

Segundo Loureiro (2006), recomenda-se na prática o valor máximo de 2,0 MPa para a pré compressão média. Valores mais altos, até 3,5 MPa, são admitidos pelo ACI 318, mas resultam em maior encurtamento inicial, em maiores perdas por deformação lenta e, também, dependendo do comprimento da laje, pode ser necessário verificar a retenção da força de protensão pelos pilares.

Projetos analisados

Foram analisados dois projetos com lajes planas, denominados de projetos A e B. Ambos tem lajes maciças de 20 cm e todos os pilares com seção 35×60 cm, conforme mostrado na Figura 1. Adotou-se concreto $f_{ck} = 35$ MPa, $f_{ckj} = 24,5$ MPa (resistência na data da protensão) e monocordoalhas engraxadas ϕ 12,7 mm CP- 190 RB.

Para todos os projetos foram consideradas carga permanente de 2 kN/m², variável também de 2 kN/m² e uma carga linear de 5 kN/m nas bordas da laje. Considerou-se coeficiente de ponderação da carga acidental para combinação frequente de $\psi_1 = 0,6$.

Ambos os projetos foram analisados nos programas TQS (versão 21.5) e Adapt (versão 2016). Inicialmente fez-se o dimensionamento dos projetos no TQS. Após a definição do número de cabos, fez-se a análise no ADAPT, mantendo-se a mesma armadura ativa empregada no TQS, mesmo que algumas verificações não fossem atendidas no ADAPT. Optou-se por utilizar estes dois programas porque são duas excelentes ferramentas que fazem a análise por processos distintos (grelha e MEF), de forma a comparar os resultados e avaliar de forma mais precisa a influência da redução da pré-compressão em lajes planas.

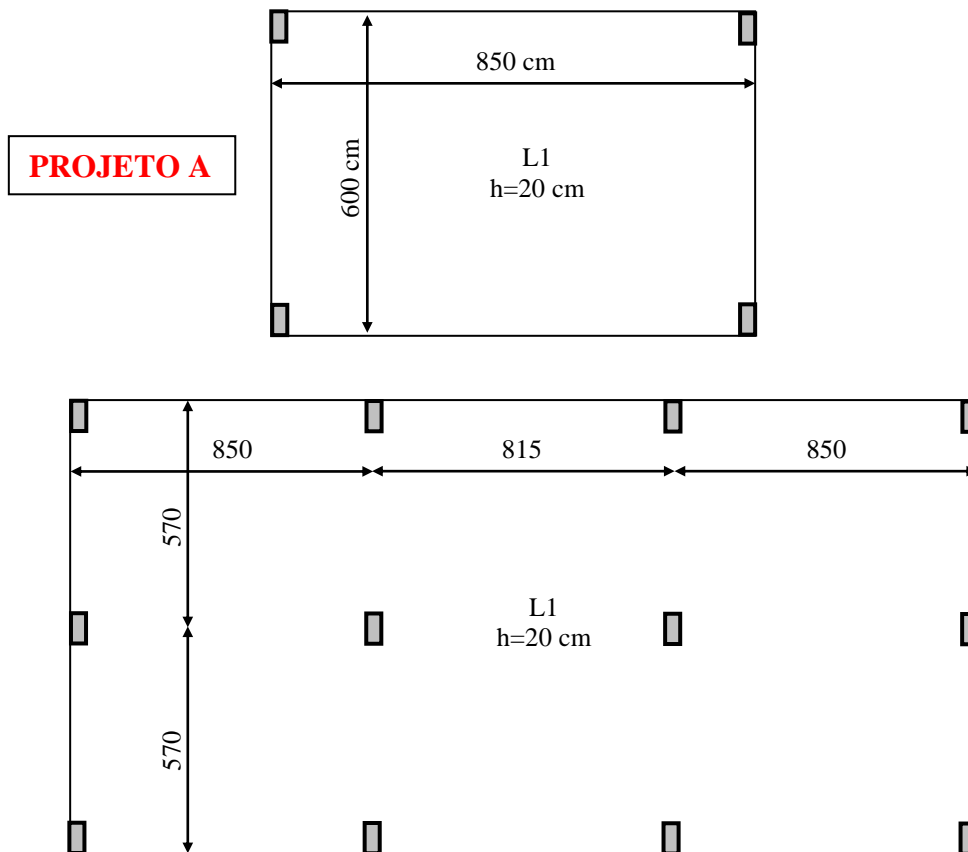


Figura 1 – Projetos analisados

No TQS foram consideradas as perdas imediatas e as perdas progressivas foram consideradas iguais a 15%. As ancoragens ativas foram consideradas alternadas, de forma a manter a simetria do projeto (perdas constantes ao longo da laje). No ADAPT considerou-se força de protensão no tempo infinito constante e igual a 120 kN = 12 tf por cabo.

A Tabela 2 apresenta as tensões limites consideradas nos projetos. O limite de tração para atender ao ELS-F - Estado Limite de Formação de Fissuras - ($f_{ct,f} = \alpha f_{ctk,inf}$) foi respeitado nas duas direções dos projetos, para a combinação frequente, de forma a caracterizar Protensão Limitada.

Tabela 2 - Tensões limites adotadas

Verificação	Tensões admissíveis	
	Compressão	Tração
Ato da protensão	$0,7 f_{ckj} = 17,2 \text{ MPa}$	$1,2 f_{ctmj} = 0,36 f_{ckj}^{2/3} = 3,04 \text{ MPa}$
Combinação frequente	$0,6 f_{ck} = 21,0 \text{ MPa}$	$\alpha f_{ctk,inf} = 0,315 f_{ck}^{2/3} = 3,37 \text{ MPa}$

Projeto A

Ao todo foram feitos 5 modelos para o **Projeto A**, ilustrados na Figura 2. O primeiro modelo, denominado **Projeto A/1,0**, foi definido considerando-se o critério de protensão limitada (atendimento do ELS-F para combinação frequente nas duas direções) e respeitando-se a pré-compressão mínima de norma ($\sigma_{med} = 1,0 \text{ MPa}$). Os demais modelos foram criados

reduzindo-se a intensidade da protensão na direção do menor vão, empregando-se valores abaixo da pré-compressão mínima exigida por norma, e foram assim denominados:

- **Projeto A/1,0** – Projeto A com pré-compressão no menor vão de 1,0 MPa;
- **Projeto A/0,7** – Projeto A com pré-compressão no menor vão de 0,7 MPa;
- **Projeto A/0,5** – Projeto A com pré-compressão no menor vão de 0,5 MPa;
- **Projeto A/0,4** – Projeto A com pré-compressão no menor vão de 0,4 MPa;
- **Projeto A/0,0** – Projeto A com pré-compressão no menor vão de 0,0 MPa;

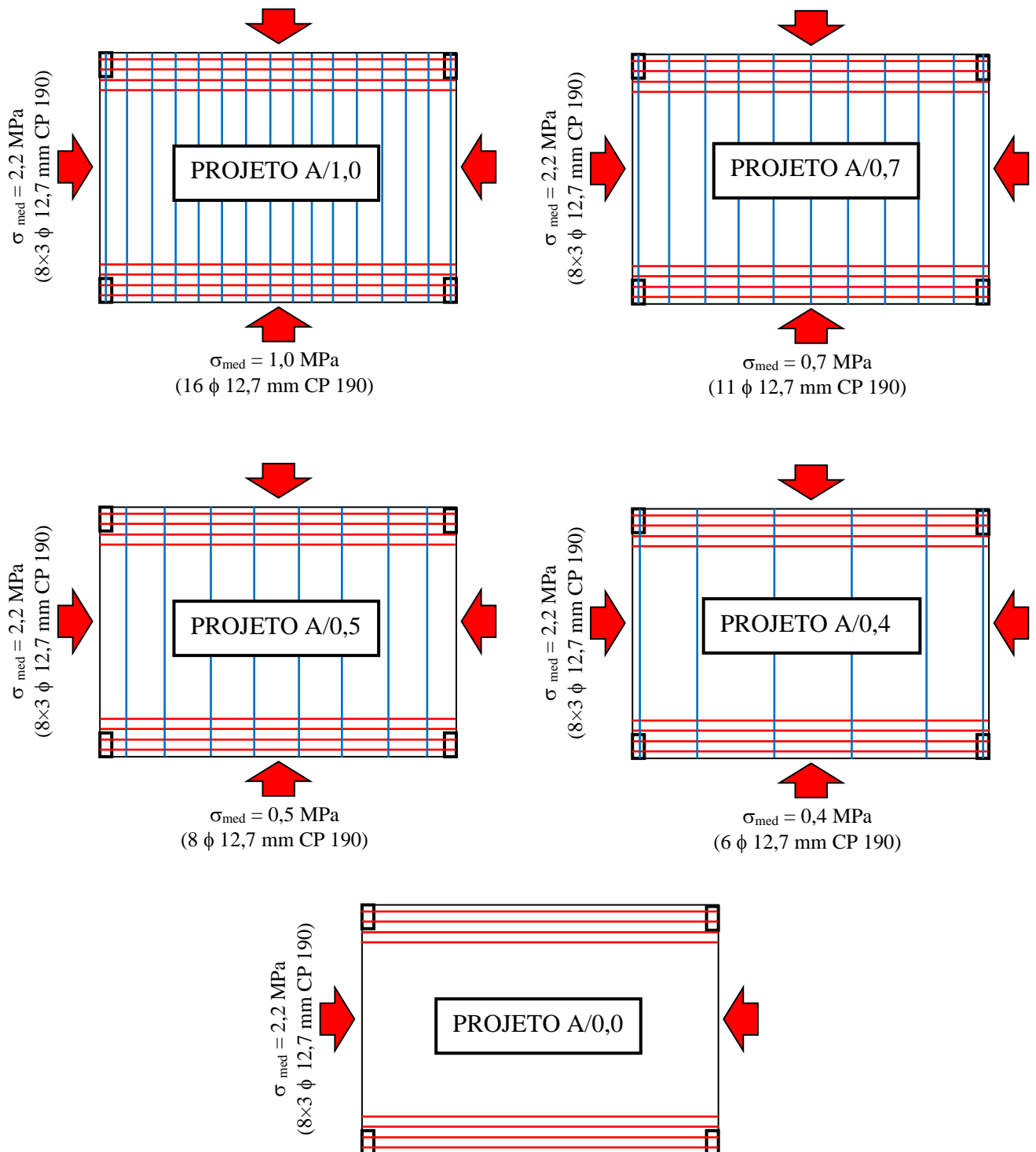


Figura 2 – Modelos para o Projeto A.

Observa-se na Figura 2 que em todos os modelos foram usados cabos concentrados na direção x, mantendo-se o mesmo número de cordoalhas em todos modelos (24 ϕ 12,7 mm CP 190 RB). Na direção do menor vão (direção y), o número de cordoalhas foi sendo reduzido em cada modelo, conseqüentemente, a pré-compressão também. No **Projeto A/1,0** foram usadas 16 cordoalhas na direção y, de forma distribuída. Por outro lado, no **Projeto A/0,0** não se empregou nenhuma cordoalha na direção y, ou seja, apenas armadura passiva no menor vão.

Para ilustrar os resultados obtidos por meio dos programas TQS e ADAPT, optou-se por mostrar apenas o **Projeto A/1,0**. Os demais resultados serão apresentados em forma de tabela.

Na Figuras 3 são mostradas as tensões ao longo da direção y (menor vão), nos bordos inferior e superior para a combinação frequente para o **Projeto A/1,0**, obtidas por meio do programa TQS. Observa-se que a maior tensão de tração foi 0,4 MPa (4,0 kgf/cm²), a qual está bem abaixo do valor limite para atender o ELS-F (3,4 MPa = 34 kgf/cm²). Entretanto, neste modelo não foi possível reduzir o número de cabos em função do atendimento da pré-compressão mínima exigida pela NBR 6118:2014 (1,0 MPa). Caso não existisse este limite, seria possível reduzir o número de cordoalhas e mesmo assim atender ao ELS-F.

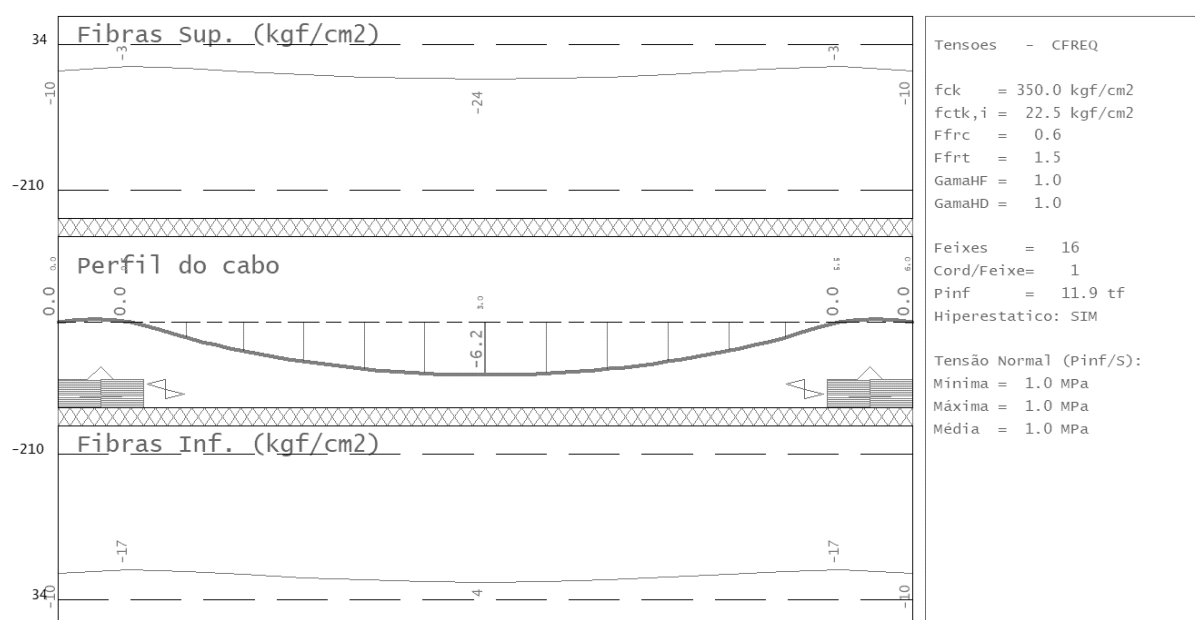


Figura 3 – Tensões ao longo do comprimento da faixa na direção y do Projeto A/1,0, analisado no programa TQS

Este mesmo projeto foi analisado no programa ADAPT, mantendo-se o mesmo número de cabos. A Figura 4 apresenta as tensões nos bordos superior (em verde) e inferior (em azul), obtidas no programa ADAPT, com a combinação frequente, para o **Projeto A/1,0**. Observa-se que, na direção do menor vão (y), a maior tração foi 1,47 MPa, valor este inferior ao limite de 3,4 MPa para o ELS-F.

Na tabela 3 são apresentadas as tensões para todos os modelos do Projeto A, para combinação frequente, que ocorrem na direção na qual é feita a redução do número de cabos (direção y). Observa-se que nos dois programas tem-se um aumento das tensões de tração no bordo inferior à medida que o nível de protensão diminui.

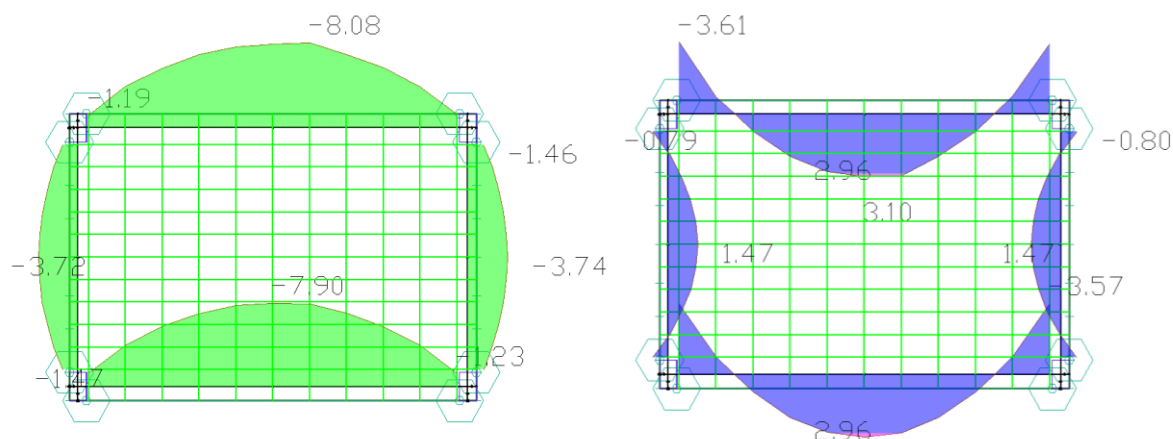


Figura 4 - Tensões nas faixas verticais e horizontais para o Projeto A/1,0, para Combinação Freqüente, obtidas por meio do programa ADAPT (na esquerda as tensões no bordo superior e, na direita, no bordo inferior)

Verifica-se que as tensões obtidas no programa ADAPT foram um pouco superiores aos valores obtidos no programa TQS, no qual configurou-se para analisar a partir dos momentos médios. Porém, pode-se verificar que em todos os modelos as tensões não ultrapassam ao limite para o atendimento ao ELS-F (3,4 MPa). Ou seja, mesmo para o projeto com pré-compressão de 0,4 MPa tem-se uma situação de protensão limitada. Convém destacar que as tensões na direção x praticamente não se alteraram com a redução da protensão em y.

Tabela 3 – Tensões para a combinação freqüente no centro do vão da direção y, para os Projetos A

		Projeto A/1,0	Projeto A/0,7	Projeto A/0,5	Projeto A/0,4	Projeto A/0,0
Tensão no bordo superior na direção y (MPa)	TQS	- 2,40	- 2,60	- 2,70	- 2,70	-
	ADAPT	- 3,74	- 3,93	- 4,05	- 4,13	-
Tensão no bordo inferior na direção y (MPa)	TQS	0,40	1,20	1,70	2,00	-
	ADAPT	1,47	2,37	2,91	3,27	-

Na figura 5 são mostrados os deslocamentos verticais obtidos nos dois programas, para o Projeto A/1,0. No programa TQS a flecha máxima foi de 18,4 mm, obtida pela análise linear e com a combinação freqüente. No ADAPT a flecha máxima obtida, para a mesma combinação, foi de 18,44 mm.

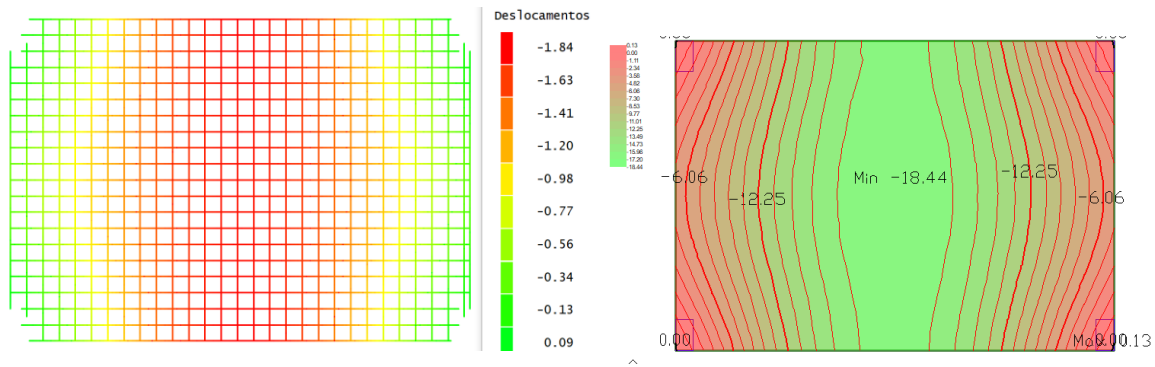


Figura 5 – Deslocamento vertical obtidos nos programas TQS (esquerda) e ADAPT (direita)

Na tabela 4 são apresentados os deslocamentos máximos para todos os modelos do Projeto A. Observa-se que o deslocamento na laje não aumentou consideravelmente à medida que se reduziu a protensão apenas em y. Para o modelo do TQS, aumentou apenas 7,61% do **Projeto A/1,0** (18,4 mm) para o **Projeto A/0,4** (19,8 mm). Destaca-se que todos os modelos atendem o ELS-DEF, pois os deslocamentos são inferiores ao limite de $L/250$ (24 mm).

Tabela 4 – Deslocamentos verticais para os projetos A

		Projeto A/1,0	Projeto A/0,7	Projeto A/0,5	Projeto A/0,4	Projeto A/0,0
Deslocamento vertical máximo (mm)	TQS	18,4	18,8	19,4	19,8	21,0
	ADAPT	18,4	18,6	19,0	19,2	19,4

Na tabela 5 são mostradas as taxas de armadura positivas passivas obtidas para todos os modelos do Projeto A, por meio dos dois programas. Os valores obtidos no ADAPT são superiores aos obtidos no TQS, principalmente na direção x. É importante observar que a redução da protensão na direção y não alterou a armadura passiva na direção x nos dois programas.

Tabela 5 – Armaduras passivas calculadas para os Projetos A

		Projeto A/1,0	Projeto A/0,7	Projeto A/0,5	Projeto A/0,4	Projeto A/0,0
Taxa arm. passiva positiva em x (%)	TQS	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	ADAPT	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Taxa arm. passiva positiva em y (%)	TQS	0,12	0,14	0,14	0,15	0,33
	ADAPT	0,12	0,14	0,19	0,23	0,32

Já na direção y, como era esperado, a taxa de armadura passiva aumentou à medida que se reduziu a pré-compressão. A Figura 6 mostra a variação da taxa de armadura passiva positiva, na direção y, para as diferentes tensões de pré-compressão dos modelos. Observa-se que no programa ADAPT o aumento da taxa foi quase linear e superior aos valores obtidos no TQS. Por outro lado, no TQS a taxa permaneceu quase inalterada até a pré-compressão de 0,4 MPa, e depois teve um considerável incremento para o modelo sem protensão.

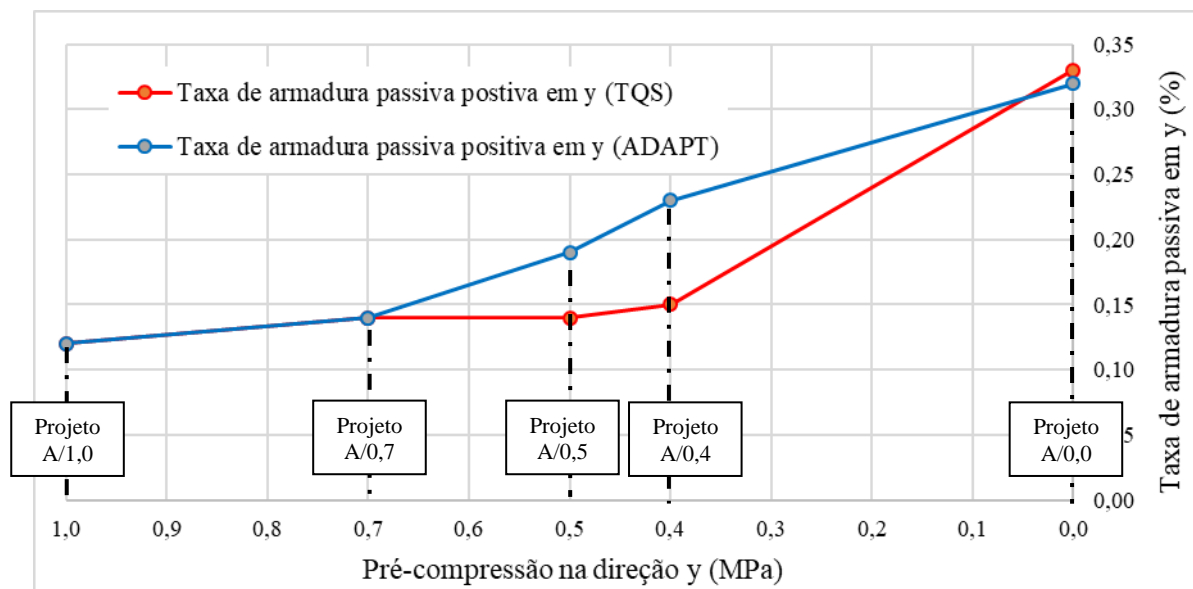


Figura 6 – Variação da taxa de armadura passiva positiva, na direção y, em função da redução da pré-compressão nos Projetos A

A armadura negativa junto aos pilares foi determinada, em quase todos os modelos, pelo valor mínimo prescrito na NBR 6118:2014 para lajes planas e indicado na Tabela 1 ($A_s \geq 0,00075 h \lambda$).

As armaduras de punção foram calculadas por meio de uma planilha auxiliar desenvolvida, utilizando-se para tanto os esforços fornecidos pelo programa TQS. Foram adotados estribos na laje, distribuídos radialmente. Considerou-se o efeito favorável da protensão para o aumento da tensão resistente. Optou-se por não considerar a redução na tensão solicitante de cálculo devido à inclinação dos cabos nos perímetros C' e C''. Apesar da redução da pré-compressão nos modelos, a armadura de punção detalhada foi a mesma em todos os projetos. Ou seja, a redução da pré-compressão para valores inferiores ao mínimo de norma, em uma das direções, praticamente não influenciou na armadura necessária para punção.

A Tabela 6 apresenta os consumos de armadura ativa e passiva para os Projetos A. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados obtidos por meio dos dois programas. A Figura 7 ilustra estes valores em forma de gráfico. Observa-se o aumento do consumo de armadura passiva à medida que se diminui a pré-compressão em uma das direções. Porém, o aumento do consumo de armadura passiva é muito pequeno até o **Projeto A/0,4**.

Tabela 6 – Consumo de armadura passiva e ativa para os projetos A

		Projeto A/1,0	Projeto A/0,7	Projeto A/0,5	Projeto A/0,4	Projeto A/0,0
Consumo de armadura passiva (kg/m²)	TQS	9,29	10,10	10,10	10,43	13,69
	ADAPT	8,73	9,23	9,96	10,32	11,46
Consumo de armadura ativa (kg/m²)	TQS	5,61	5,04	4,69	4,47	3,78
	ADAPT					

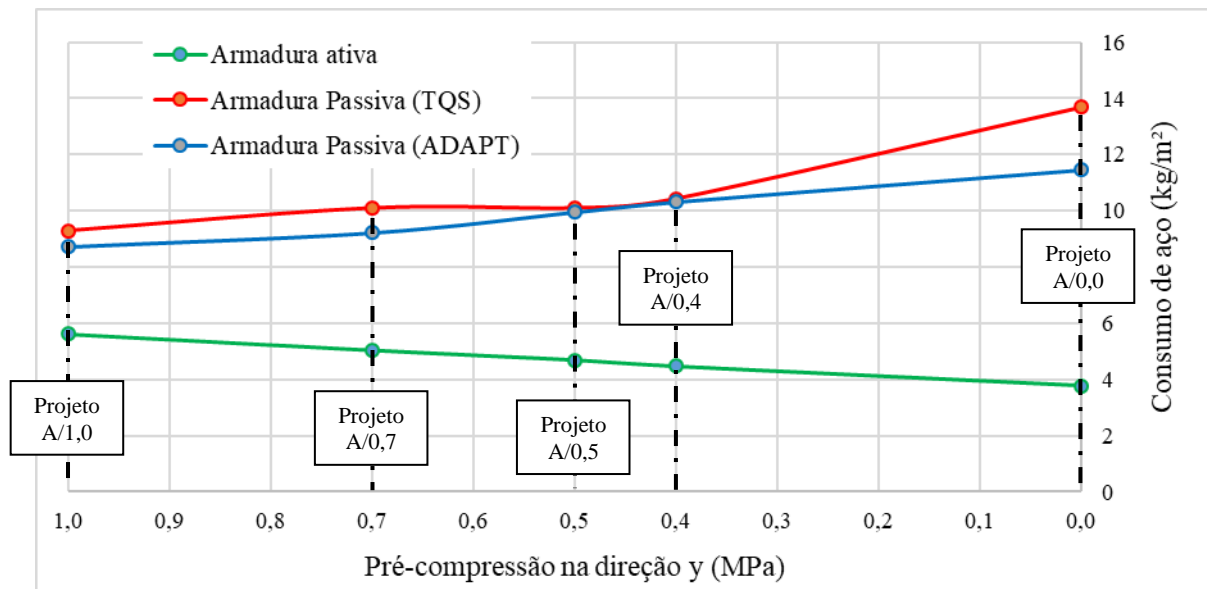


Figura 7 – Variação do consumo das armaduras ativas e passivas para os Projetos A

Por fim, determinaram-se os custos de armadura (ativa e passiva) em todos os modelos do Projeto A. Considerou-se o valor da armadura ativa, incluindo acessórios de protensão e a mão de obra, de R\$ 15,00/kg e a armadura passiva, de R\$ 5,00/kg. Com base nesses valores montou-se a Tabela 7, utilizando-se apenas os quantitativos obtidos pelos dois programas, com as edições necessárias para armadura negativa e armadura de punção.

Assim, pode-se concluir que, na análise por meio do programa TQS, o modelo mais econômico foi o **Projeto A/0,4**, o qual considera uma pré-compressão de 0,4 MPa na direção do menor vão, bem inferior ao mínimo de norma. Ressalta-se que este modelo apresentou adequado comportamento em serviço, atendendo ao ELS-DEF e ELS-F (para combinação frequente), e armaduras passivas transversais e longitudinais em taxas bastante próximas ao **Projeto A/1,0**. O **Projeto A/0,5** apresentou comportamento bem similar, portanto também pode ser considerado uma alternativa interessante para o Projeto A. Na análise pelo programa ADAPT, o modelo mais econômico foi o **Projeto A/0,0** (sem protensão em y), mas os **Projetos A/0,5** e **A/0,4** também se mostraram alternativas econômicas e com resultados próximos aos obtidos pelo TQS.

Tabela 7 – Custo total com as armaduras passivas e ativas para os Projetos A

		Projeto A/1,0	Projeto A/0,7	Projeto A/0,5	Projeto A/0,4	Projeto A/0,0
Custo de armadura (passiva + ativa)	TQS	R\$ 6.660,00	R\$ 6.430,00	R\$ 6.160,00	R\$ 6.080,00	R\$ 6.385,00
	%	-	- 3,45%	- 7,51%	- 8,71%	- 4,13%
	ADAPT	R\$ 6.516,30	R\$ 6.208,70	R\$ 6.125,60	R\$ 6.051,20	R\$ 5.817,10
	%	-	- 4,72%	- 6,00%	- 7,14%	- 10,73%

Projeto B

Seguindo a mesma metodologia usada no Projeto A, foram feitos também 5 modelos para o **Projeto B**, ilustrados na Figura 8.

O primeiro modelo, denominado **Projeto B/1,0**, foi definido considerando-se o critério de protensão limitada (atendimento do ELS-F para combinação frequente nas duas direções) e respeitando-se a pré-compressão mínima de norma ($\sigma_{med} = 1,0$ MPa). Os demais modelos foram criados reduzindo-se a intensidade da protensão na direção do menor vão, empregando-se valores abaixo da pré-compressão mínima exigida por norma, e foram assim denominados:

- **Projeto B/1,0** – Projeto B com pré-compressão no menor vão de 1,0 MPa;
- **Projeto B/0,7** – Projeto B com pré-compressão no menor vão de 0,7 MPa;
- **Projeto B/0,5** – Projeto B com pré-compressão no menor vão de 0,5 MPa;
- **Projeto B/0,4** – Projeto B com pré-compressão no menor vão de 0,4 MPa;
- **Projeto B/0,0** – Projeto B com pré-compressão no menor vão de 0,0 MPa;

Observa-se na Figura 8 que em todos os modelos foram usados cabos concentrados na direção x, mantendo-se o mesmo número de cordoalhas em todos modelos (40 ϕ 12,7 mm CP 190 RB). Na direção do menor vão (direção y), o número de cordoalhas foi sendo reduzido em cada modelo, conseqüentemente, a pré-compressão também. No **Projeto B/1,0** foram usadas 46 cordoalhas na direção y, de forma distribuída.

Assim como no projeto A, optou-se por mostrar os resultados apenas o **Projeto B/1,0**. Os demais resultados serão apresentados em forma de tabela.

A Figura 9 apresenta as tensões na direção y (com cabos distribuídos no menor vão), para a combinação frequente para o **Projeto B/1,0**, obtidas por meio do programa TQS. Estas tensões se referem à faixa mais externa da laje.

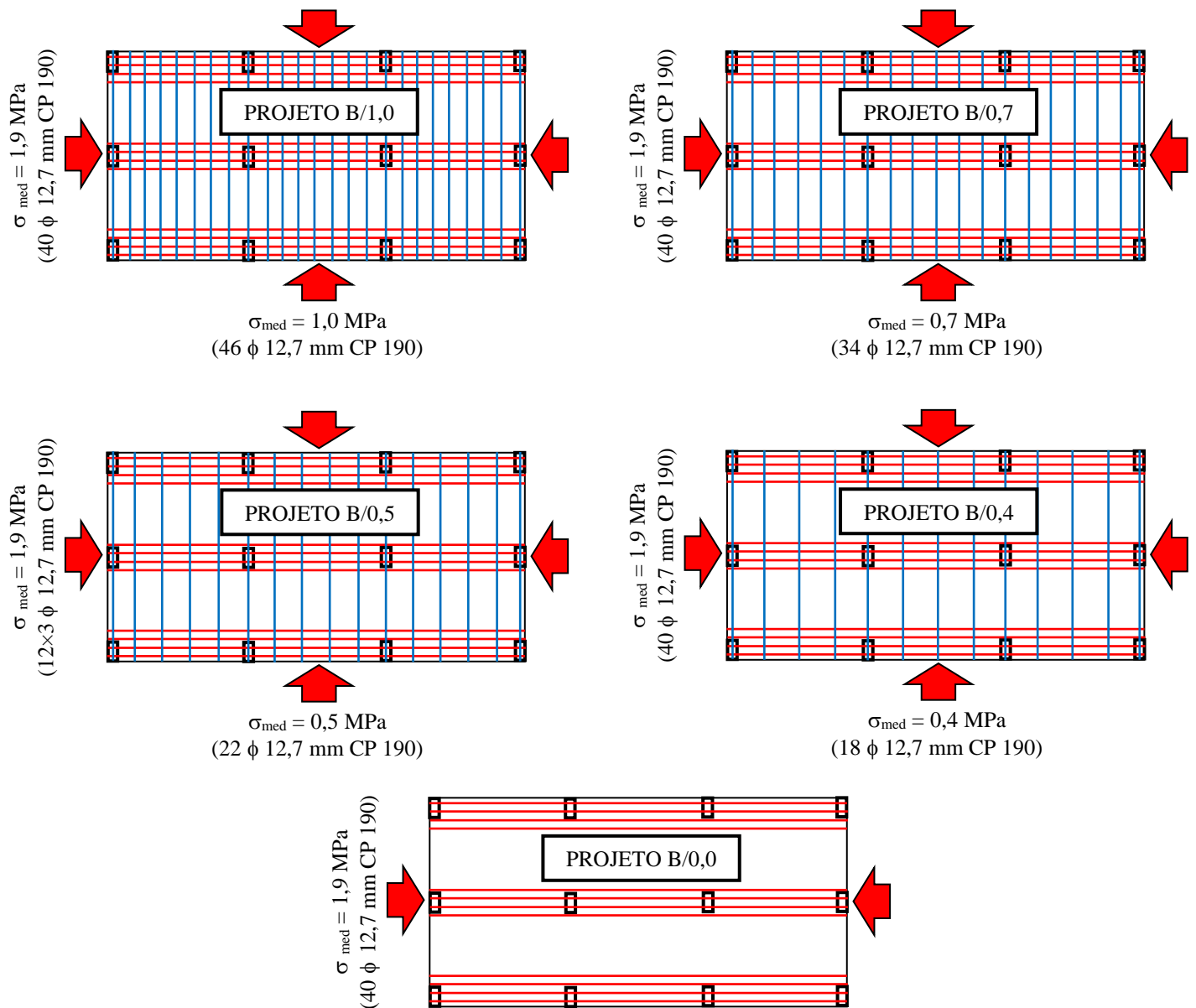


Figura 8 – Modelos do Projeto B

Observa-se que não ocorreram tensões de tração ao longo do comprimento da tributária. No primeiro vão tem-se como menor compressão -0,2 MPa. Isto significa que seria possível reduzir o número de cabos e mesmo assim atender ao ELS-F para combinação frequente. Entretanto, neste caso o limitante é atender a pré-compressão mínima de norma de 1 MPa, que obrigou a utilizar 46 cordoalhas ao longo do menor vão.

Este mesmo projeto foi analisado no programa ADAPT, mantendo-se o mesmo número de cabos. A Figura 10 apresenta as tensões nos bordos superior (em verde) e inferior (em azul), obtidas no programa ADAPT, com a combinação frequente, para o **Projeto B/1,0**. Observa-se que a maior tração, na direção y, ocorreu no bordo inferior, na tributária mais externa, e no valor de 1,57 MPa, sendo este valor inferior ao limite de 3,4 MPa para o ELS-F.

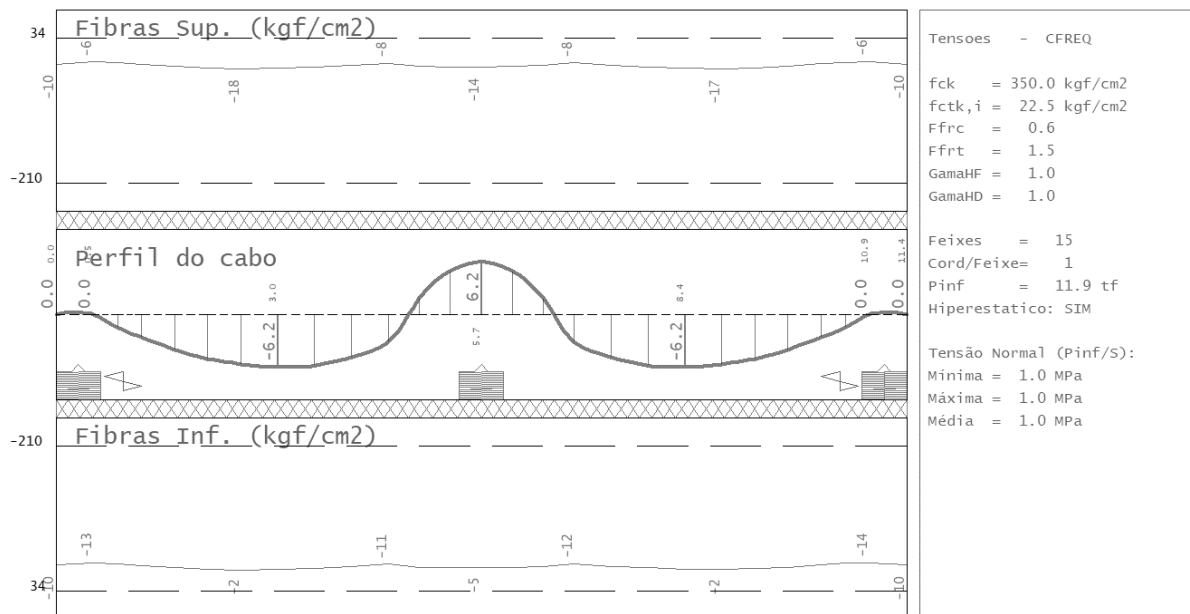


Figura 9 – Tensões ao longo do comprimento da faixa na direção y do Projeto B/1,0, analisado no programa TQS (tributária mais externa)

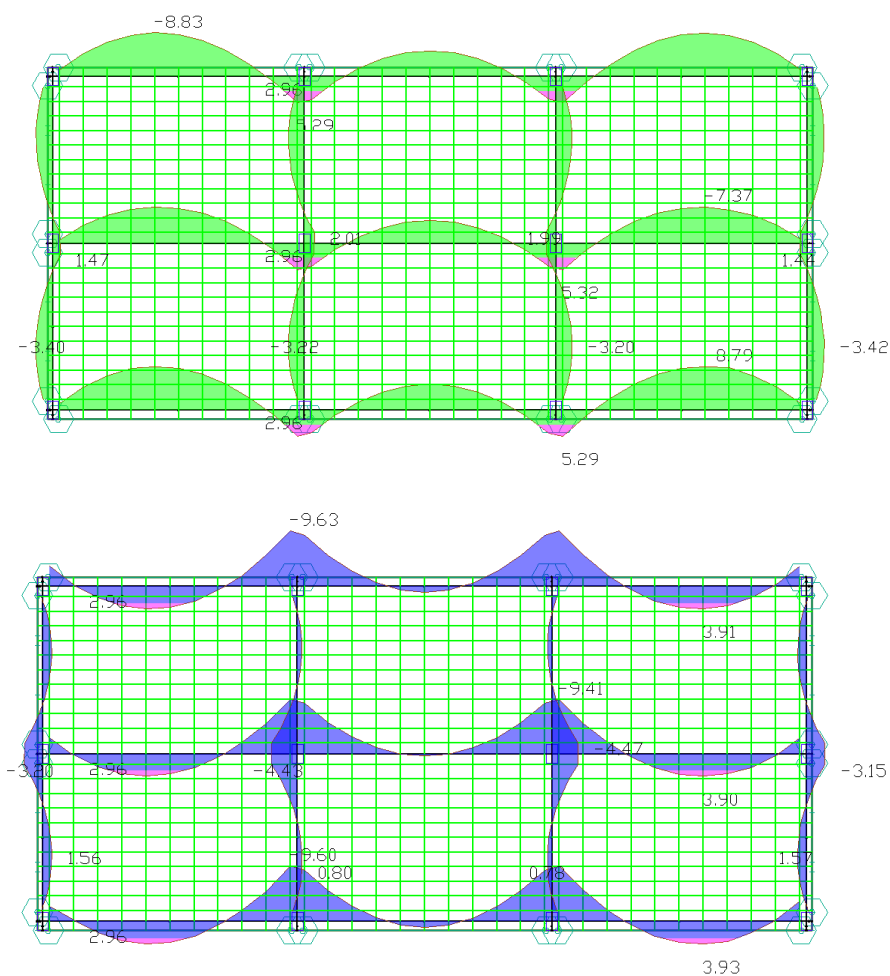


Figura 10 - Tensões nas faixas verticais e horizontais para o Projeto B/1,0, para Combinação Freqüente, obtidas por meio do programa ADAPT (em verde as tensões no bordo superior e, em azul, no bordo inferior)

Na tabela 8 são apresentadas as tensões, para combinação frequente, que ocorrem na direção na qual é feita a redução do número de cabos (direção y), no primeiro vão da tributária mais externa. Observa-se que nos dois programas tem-se um aumento das tensões de tração no bordo inferior à medida que o nível de protensão diminui.

Tabela 8 – Tensões para a combinação frequente no primeiro vão da tributária mais externa em y

		Projeto B/1,0	Projeto B/0,7	Projeto B/0,5	Projeto B/0,4	Projeto B/0,0
Tensão no bordo superior na direção y (MPa)	TQS	- 1,80	- 1,90	- 1,90	- 2,00	-
	ADAPT	-3,42	-3,23	-3,03	-2,96	-
Tensão no bordo inferior na direção y (MPa)	TQS	-0,20	0,40	1,00	1,20	-
	ADAPT	1,57	1,93	2,25	2,41	-

Verifica-se que as tensões obtidas no programa ADAPT foram um pouco superiores aos valores obtidos no programa TQS, no qual configurou-se para analisar a partir dos momentos médios. Porém, pode-se verificar que em todos os modelos as tensões não ultrapassam ao limite para o atendimento ao ELS-F (3,4 MPa). Ou seja, mesmo para o projeto com pré-compressão de 0,4 MPa tem-se uma situação de protensão limitada.

Na figura 11 são mostrados os deslocamentos verticais obtidos nos dois programas, para o **Projeto B/1,0**. No programa TQS a flecha máxima foi de 11,2 mm, obtida pela análise linear e combinação frequente. No ADAPT a flecha máxima obtida, para a combinação frequente, foi de 16,55 mm.

Na tabela 9 são apresentados os deslocamentos máximos para todos os modelos do Projeto B. Observa-se que o deslocamento máximo na laje praticamente não aumentou à medida que se reduziu a protensão apenas em y. Na verdade até diminuiu nos modelos analisados no ADAPT. Isto é mais um indicativo que neste tipo de projeto é possível adotar pré-compressão inferior ao valor mínimo exigido pela norma brasileira.

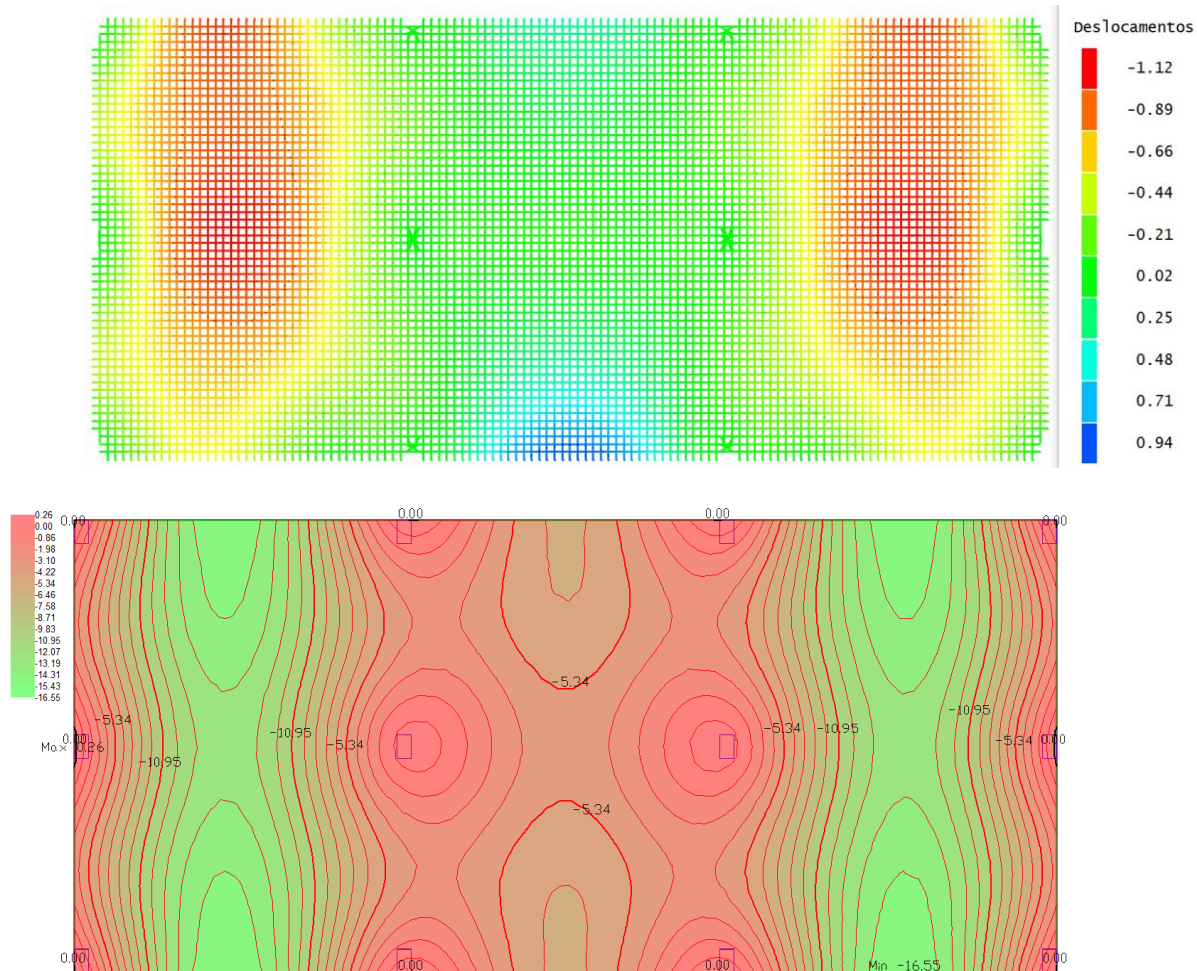


Figura 11 – Deslocamentos verticais obtidos nos programas TQS (em cima) e ADAPT (embaixo) para o Projeto B/1,0

Tabela 9 – Deslocamentos verticais máximos para os projetos B

		Projeto B/1,0	Projeto B/0,7	Projeto B/0,5	Projeto B/0,4	Projeto B/0,0
Deslocamento vertical máximo (mm)	TQS	11,2	11,3	11,4	11,4	12,0
	ADAPT	16,5	16,3	16,0	15,9	15,6

Com relação às armaduras passivas positivas, assim como no Projeto A, verificou-se que a redução da pré-compressão em y não influenciou na taxa de armadura na direção x. Em y, teve-se um pequeno aumento da armadura passiva.

A armadura passiva negativa praticamente se manteve constante nos modelos, em função da armadura mínima sobre os pilares prescrita por norma.

Assim como no Projeto A, verificou-se que a redução da pré-compressão influenciou muito pouco na tensão resistente à punção. Consequentemente, em todos os modelos do Projeto B se adotou a mesma armadura transversal junto aos pilares.

A Tabela 10 apresenta os consumos de armadura ativa e passiva para os Projetos B. Observa-se uma boa concordância nos resultados obtidos pelos dois programas até o Projeto B/0,4. Para o Projeto B/0,0 (sem protensão em y), o consumo de armadura no TQS foi bem maior, enquanto no ADAPT manteve-se um crescimento linear. A Figura 12 ilustra estes valores em forma de gráfico. Observa-se o aumento do consumo de armadura passiva à medida que se diminui a pré-compressão em uma das direções. Porém, o aumento do consumo de armadura passiva é muito pequeno até o **Projeto B/0,4**.

Tabela 10 – Consumo de armadura passiva e ativa para os projetos B

		Projeto B/1,0	Projeto B/0,7	Projeto B/0,5	Projeto B/0,4	Projeto B/0,0
Consumo de armadura passiva (kg/m ²)	TQS	7,64	7,64	7,88	8,10	16,25
	ADAPT	8,68	9,01	9,26	9,41	10,41
Consumo de armadura ativa (kg/m ²)	TQS	4,90	4,45	4,00	3,85	3,18
	ADAPT					

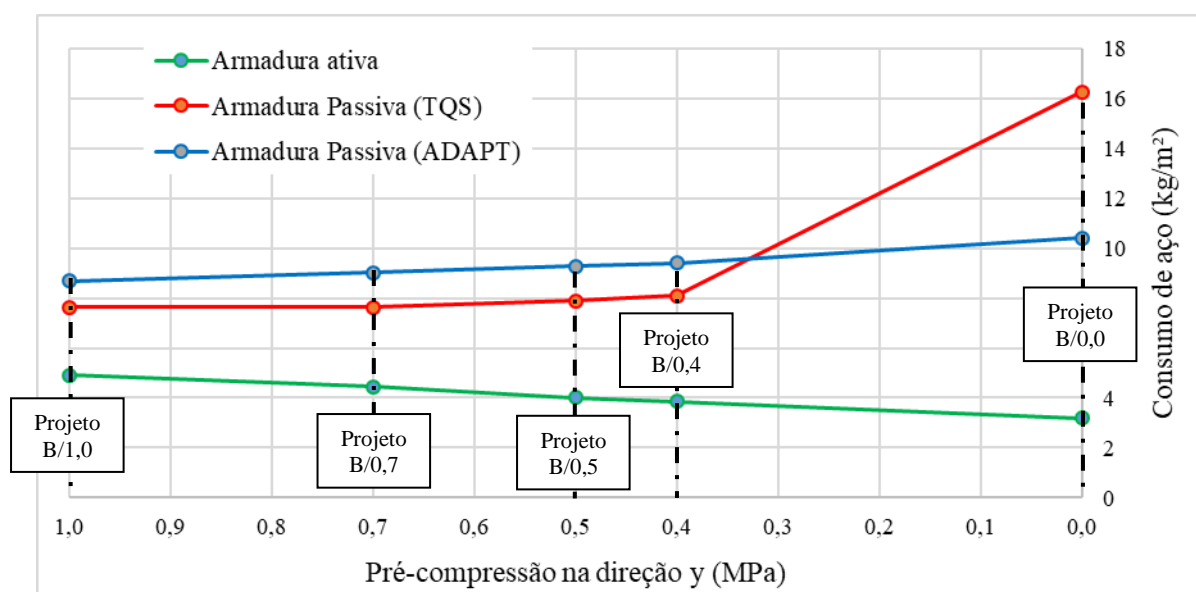


Figura 12 – Taxas de armaduras passiva e ativa para os modelos do Projeto B

Por fim, determinaram-se os custos de armadura (ativa e passiva) em todos os modelos do Projeto B. Consideraram-se os mesmos valores unitários citados no Projeto A. Tabela 11 apresenta o custo total com armaduras para os quantitativos obtidos pelos dois programas, com as edições necessárias para armadura negativa e armadura de punção.

Pode-se concluir que, assim como no Projeto A, o modelo mais econômico na análise pelo TQS foi o que considera uma pré-compressão de apenas 0,4 MPa na direção do menor vão (**Projeto B/0,4**), bem inferior ao mínimo de norma. Ressalta-se que este modelo apresentou adequado comportamento em serviço, atendendo ao ELS-DEF e ELS-F (para combinação frequente), e armaduras passivas transversais e longitudinais em taxas bastante próximas ao **Projeto B/1,0**. O **Projeto B/0,5** apresentou comportamento bem similar, portanto também pode ser considerado uma alternativa interessante.

Na análise pelo programa ADAPT o modelo mais econômico foi o **Projeto B/0,0** (sem protensão em y), mas os **Projetos B/0,5** e **B/0,4** também se mostraram alternativas econômicas e com resultados próximos aos obtidos pelo TQS.

Tabela 11 – Custo total com as armaduras passivas e ativas para os Projetos B

		Projeto B/1,0	Projeto B/0,7	Projeto B/0,5	Projeto B/0,4	Projeto B/0,0
Custo de armadura (passiva + ativa)	TQS	R\$ 31.580,00	R\$ 29.670,00	R\$ 28.100,00	R\$ 27.785,00	R\$ 36.445,00
	%	-	- 6,05%	- 11,02%	- 12,02%	+ 15,41%
	ADAPT	R\$ 33.046,20	R\$ 31.607,90	R\$ 30.053,00	R\$ 29.633,20	R\$ 28.184,05
	%	-	- 4,35%	- 9,06%	- 10,33%	- 14,71%

Conclusões

No presente trabalho foi avaliada a influência da pré-compressão em dois projetos de lajes planas protendidas com vãos menores em uma das direções. Em cada projeto foram analisados 5 modelos, nos quais foi variada a tensão de pré-compressão na direção do menor vão (1,0 MPa; 0,7 MPa; 0,5 MPa; 0,4 MPa e 0,0 MPa). Na outra direção a pré-compressão foi mantida constante.

Para se ter a correta avaliação da influência da redução da pré-compressão a níveis inferiores ao recomendado pela NBR 6118:2014 (1,0 MPa), fez-se a análise de todos os modelos nos programas TQS e ADAPT.

Os dois projetos analisados tinham vãos da ordem de 8 m em uma direção e 6 m na outra. Verificou-se que, na direção do menor vão, o atendimento à pré-compressão mínima de 1,0 MPa exigiu um número de cordoalhas muito maior que o necessário para atender ao ELS-F para a combinação frequente.

Observou-se que a redução da pré-compressão na direção do menor vão não implicou em aumento das tensões e armaduras na direção perpendicular. Também foi observado que esta redução não acarretou significativo aumento dos deslocamentos verticais nas lajes, pois as mesmas permaneceram sem abertura de fissuras até a tensão de pré-compressão de 0,4 MPa.

Com relação ao ELU, na direção na qual foi feita a redução do nível de protensão teve-se um pequeno aumento da taxa de armadura positiva até a tensão de 0,4 MPa. Para as armaduras negativas, praticamente não se teve alteração em função do valor mínimo de norma para os apoios em pilares de lajes planas. Com relação à punção, observou-se que a redução da

protensão em uma direção alterou muito pouco a tensão resistente, o que não significou aumento de área de aço transversal.

Verificou-se que, nos dois projetos, os modelos com pré-compressão de 0,4 MPa foram os mais econômicos. Além disso, estes modelos atenderam ao ELS-F para combinação frequente e ao ELS-DEF.

Observou-se que os resultados obtidos pelos dois programas (TQS e ADAPT) foram bem próximos em todos os modelos, com exceção aos modelos com protensão apenas em uma direção.

Com os resultados apresentados pode-se concluir que é possível desenvolver projetos econômicos, com adequado nível de segurança e bom comportamento em serviço, com pré-compressão inferior a 1,0 MPa, viabilizando assim o sistema protendido para projetos que apresentam vãos menores em uma direção.

Assim, acredita-se que não deveria existir a exigência de uma pré-compressão mínima na NBR 6118:2014, pois a norma já obriga o uso de armaduras passivas mínimas para momentos positivos e negativos em todas as situações.

Este limite só faz sentido para situações em que se pode suprimir a armadura passiva quando se aplica uma determinada pré-compressão mínima, como previsto no ACI 318.

Referências

AALAMI, Bijan O. **Post-tensioned Buildings: Design and Construction**. International Edition, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, AND INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ACI 318-19**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

EUROCODE 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1 General rules and rules for buildings. European Standard EN 1992-1-1:2004.

LOUREIRO, Giordano J. **Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas**. In: VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, Fortaleza, 2006.

TR43 – Post-Tensioned Concrete Floors Design Handbook. The Concrete Society, 2005.