



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Nova Abordagem para Verificação da Armadura Mínima em Vigas Protendidas Pós-Tração Aderente

Fábio Albino de Souza¹, Kelly Regina Alexandre Pereira², Larissa Camargo Carpino³

¹Unicamp / Metrocamp / Departamento de Estruturas – DES / fabio@ebpx.com.br

^{2,3}Metrocamp / NEEpro / kel.engcivil@gmail.com ; laricarpino@hotmail.com

Resumo

O presente trabalho apresenta a verificação de vigas protendidas com pós-tração aderente, empregando o Estado-Limite de Serviço e Último proposto pela NBR 6118:2014 e uma nova abordagem para o item de armadura mínima. Os dados obtidos através dos cálculos manuais foram comparados com os resultados do software ADAPT- Floor Pro 2015, o qual utiliza o método de cálculo por Elementos Finitos. O intuito inicial foi validar o modelo e também demonstrar que o software pode ser eficiente e customizado com parâmetros da norma brasileira NBR6118:2014. Atualmente na NBR 6118:2014 a armadura mínima passiva para vigas protendidas é determinada sem que haja distinção de níveis de protensão (parcial, limitada ou completa) e sem distinguir para pós-tração aderente ou não aderente. A nova sugestão para a armadura mínima consiste primeiramente em aplicá-la para vigas protendidas com pós-tração aderente e protensão completa sendo o cálculo da armadura mínima advindo do momento mínimo proposto pela NBR 6118:2014, porém a armadura mínima encontrada seria ativa ou seja, armadura mínima ativa adicional. Assim para validação da viga nesse modelo seria comparado 90% do momento de cálculo sendo maior que a soma do momento de fissuração mais o momento mínimo. O ACI-318-14 faz uma validação que dispensa a utilização de armadura mínima passiva em vigas protendidas pós-tração aderente se 90% do momento de cálculo for maior que 1,20 do momento de fissuração. Também foi feita uma comparação entre o método proposto pelo ACI 318-14 e a nova abordagem proposta nesse artigo e os valores ficaram muito próximos, com uma diferença de 1.41%.

Palavras-chave

Armadura mínima ; ADAPT ; protensão ; vigas protendidas ; NBR6118:2014 ; ACI318-14

Introdução

Nós últimos anos notou-se um aumento de pesquisas, inovações e desenvolvimento no tocante a aplicação do concreto protendido, com lançamentos de novos materiais, novos sistemas de cabos e até mesmo a revisão da normativa NBR 6118:2014. Entendem-se através dessa referida norma que elementos de concreto protendido são aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão, com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como propiciar aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (ELU).

Existem diversas maneiras de classificar o concreto protendido, no entanto uma delas consiste na consideração do mecanismo de aderência entre a armadura de protensão



(armadura ativa) e o concreto. (CHUST, 2012). Sendo assim podemos classificar em: concreto protendido com aderência inicial (pré-tração), com aderência posterior (pós-tração aderente) e sem aderência (pós-tração sem aderência), onde valores-limites da força na armadura de protensão não podem superar os valores decorrentes da limitação das tensões no aço correspondentes a essa situação transitória.

Sabe-se que a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto e pode ser avaliada de uma maneira simplificada segundo as condições de exposição da estrutura, sendo assim podem-se traçar critérios de projeto que visam à durabilidade da estrutura. Diante desse aspecto a NBR 6118:2014 mostra exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental. No tocante à fissuração do concreto protendido, que acontece com menor probabilidade, as mesmas podem ser nocivas uma vez que existe a possibilidade de corrosão sob tensão das armaduras. Embora as normativas tentem estimar uma abertura de fissura que não implique em perda de durabilidade ou perda de segurança existe ao mesmo tempo a possibilidade de monitorar fissuras reais, pois eventualmente elas podem ultrapassar os valores-limite estabelecidos.

Os níveis de protensão tem relação com a intensidade da força de protensão, que, por conseguinte são proporção da armadura ativa utilizada em relação à passiva, e basicamente a normativa brasileira trabalha com três níveis de protensão que são: Protensão Parcial (nível 1), Protensão Limitada (Nível 2) e Protensão Completa (Nível 3). Assim dependendo da classe de agressividade ambiental torna-se necessário mudar o nível da protensão bem como o mecanismo de aderência entre a armadura de protensão e o concreto, obviamente para garantir as exigências de durabilidade da estrutura. Vale ressaltar que essa metodologia adotada pela tabela 13.4 da NBR 6118: 2014 tomando como referência o ensino e aprendizado do concreto protendido apresenta-se confusa e deve ser revisada a fim de melhorar seu entendimento.

Atualmente na NBR 6118:2014 a armadura mínima para vigas protendidas pode ser determinada sem que haja distinção de níveis de protensão (parcial, limitada, completa) e também sem levar em conta o mecanismo de aderência entre a armadura de protensão e o concreto. Essa abordagem difere do método apresentado pela ACI 318:2014 uma vez que a mesma apresenta verificações para o cálculo da armadura mínima levando em conta o mecanismo de aderência entre a armadura de protensão e o concreto. LOUREIRO (2015) também menciona observações e sugestões com relação aos critérios utilizados pela NBR 6118:2014 para armadura mínima.

Diante desse fato o artigo teve por objetivo estudar as duas metodologias citadas acima onde por fim apresenta-se uma nova sugestão para a armadura mínima em vigas protendidas com pós-tração aderente e protensão completa. Em adicional foi utilizada uma ferramenta computacional (ADAPT –Floor Pro 2015) para validar os cálculos manuais.

Metodologia

Segundo DOXSEY (2009) a escolha de uma metodologia específica depende principalmente do objeto do estudo, assim nesse artigo o tipo adotado será exploratório através da aplicação de estudo de caso. Foi adotada uma viga de seção retangular, bi apoiada, representada através da figura 1, cuja classe de agressividade assumida foi a II (Urbana) sendo a utilização da viga para pontes rodoviárias.

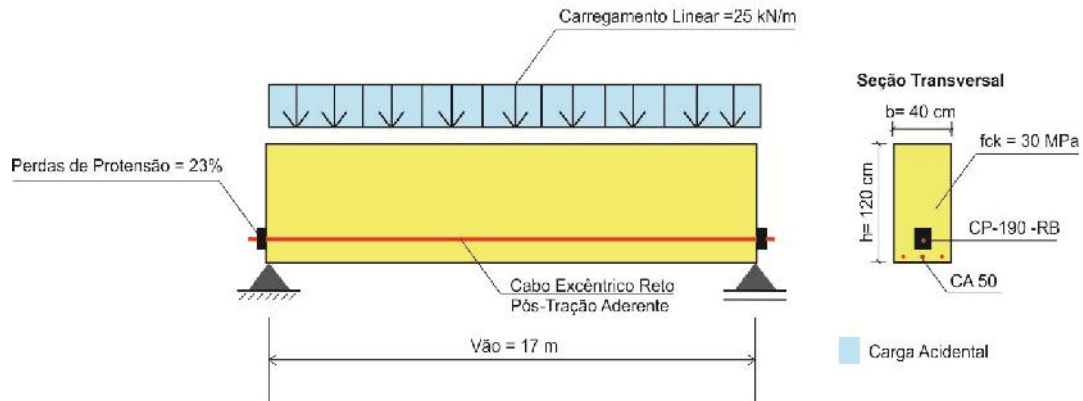


Figura 1 – Viga Adotada.

Fica evidente que o dimensionamento da armadura longitudinal de flexão em concreto armado e protendido deve ser feito para atender condições dos estados limites último e de serviço, porém torna-se usual para concreto protendido dimensionar a armadura para condições de serviço e verificá-la na ruptura. Assim a figura 2 mostra os estágios de uma viga protendida referentes à ELS (Estado-Limite de Serviço) e ELU (Estado-Limite Último).

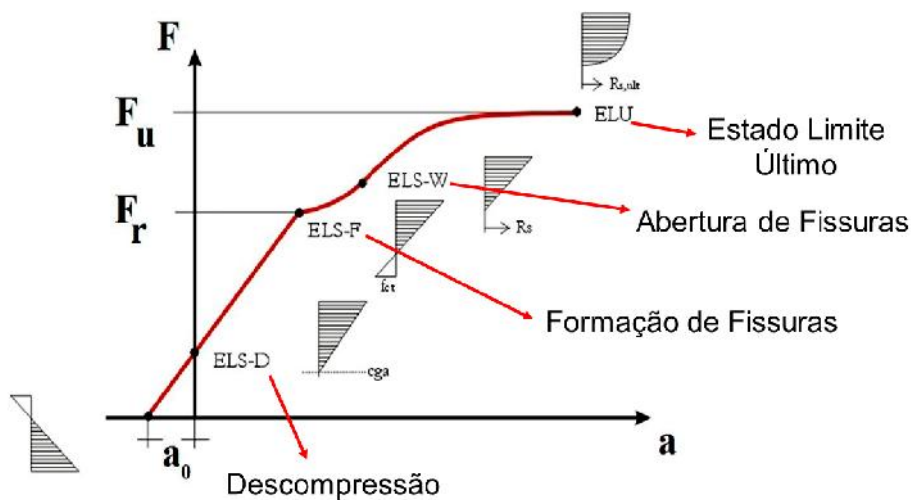


Figura 2 – Estágios de uma Viga Protendida no ELS e ELU.

A fim de entendimento dos estágios torna-se necessário elucidar as nomenclaturas que são:

ELS-D = Estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração restante na seção. Verificação usual no caso de concreto protendido.

ELS-F = Estado em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado-limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a $f_{ct,f}$.

ELS-W = Estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados em 13.4.2 da NBR 6118:2014. Porém para esse caso não será verificada essa condição uma vez que não teremos protensão parcial.



ELU = Estado-Limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.

Levando em conta a tabela 13.4 da NBR 6118:2014 e os critérios de projeto já comentados, existe a necessidade de verificação da viga considerando protensão limitada e protensão completa. Sendo assim segue a tabela 1 referente às exigências relativas à fissuração e com relação à combinação de ações em serviço:

Tabela 1 – Verificação do ELS para viga em estudo

Concreto Protendido nível 2 (protensão limitada)	ELS-F ELS-D	Combinação Frequente Combinação Quase Permanente
Concreto Protendido nível 3 (protensão completa)	ELS-F ELS-D	Combinação rara Combinação frequente

Com relação as perdas de protensão CHOLFE (2013) menciona que a força de protensão é o elemento fundamental das peças de concreto protendido e que ela aplicada através da armadura ativa, depende de componentes físicos como o aparelho tensionador, as bainhas com sua geometria e ancoragens. Também depende do comportamento intrínseco dos materiais aço e concreto cujo projeto deve prever as perdas da força de protensão em relação ao valor inicial (P_i) aplicado no aparelho tensionador. Durante a transferência da protensão ao concreto ocorrem às perdas imediatas e depois ao longo do tempo, durante a vida útil da estrutura as perdas progressivas sendo assim pode-se calcular a força P_0 com relação as perdas imediatas e também a força P_∞ após as perdas progressivas. Diante da complexidade do assunto e por não ser o foco do artigo adotou-se as perdas de protensão totais em 23%, valor que corrobora com os encontrados em bibliografias e também pode ser visto de uma maneira mais completa através de ZIA et. al (1979).

A NBR 6118 : 2013 especifica no item 9.6.1.2.1 os valores-limites por ocasião da operação de protensão, que para pós-tração por ocasião da aplicação da força P_i , a tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração deve respeitar os limites $0,74 f_{ptk}$ e $0,87 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação normal e $0,74 f_{ptk}$ e $0,82 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação baixa, sendo esse último referente a cordoalha utilizada no estudo pode ser observada na figura 1. Ao término da operação de protensão, a tensão $\sigma_{p0(x)}$ da armadura pré-tracionada ou pós-tracionada, decorrente da força $P_0(x)$, não pode superar os limites estabelecidos em 9.6.1.2.1-b da NBR 6118:2013. Vale lembrar que a cordoalha utilizada no artigo foi a CP-190 RB, ou seja, com f_{ptk} de 1900 MPa e f_{pyk} de 1700 MPa de baixa relaxação, que respeita as especificações da NBR 7483 : 2008.

A NBR 8681: 2003 fixa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil e estabelece as definições e os critérios de quantificação das ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, quaisquer que sejam sua classe e destino. Assim, devemos aplicar os fatores de redução γ_1 e γ_2 referentes às combinações de serviço, que no nosso caso são 0.5 e 0.3, respectivamente.

As figuras 3, 4, 5 e 6 mostram as condições de carregamento da viga estudada bem como as combinações necessárias e os critérios a serem respeitados para a protensão limitada e para a protensão completa.

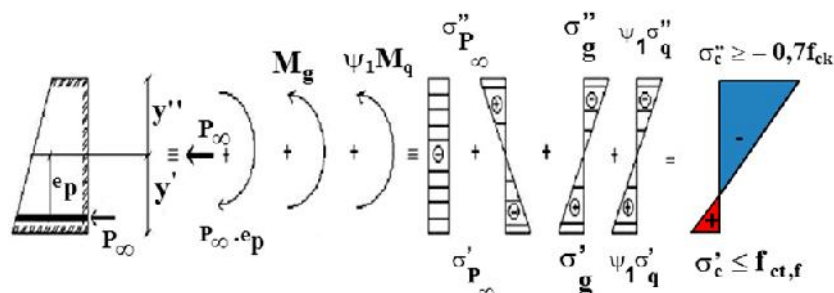


Figura 3 – Verificação ELS-F - Combinação Frequente, Protensão Limitada.

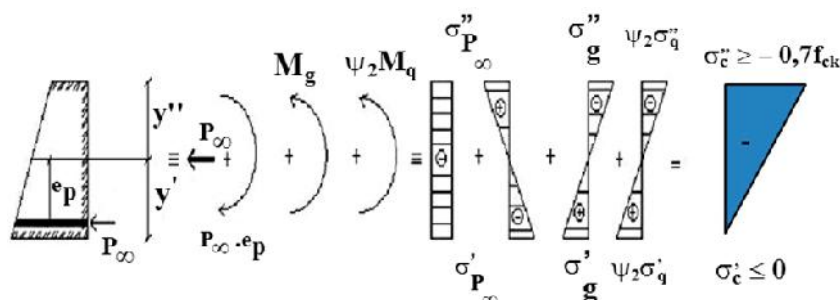


Figura 3 – Verificação ELS-D - Combinação Quase Permanente, Protensão Limitada.

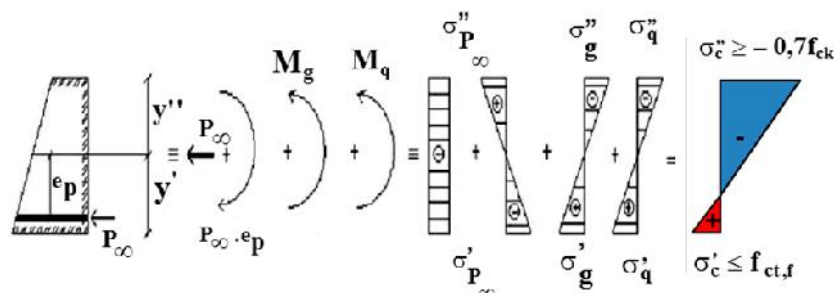


Figura 3 – Verificação ELS-F - Combinação Rara, Protensão Completa.

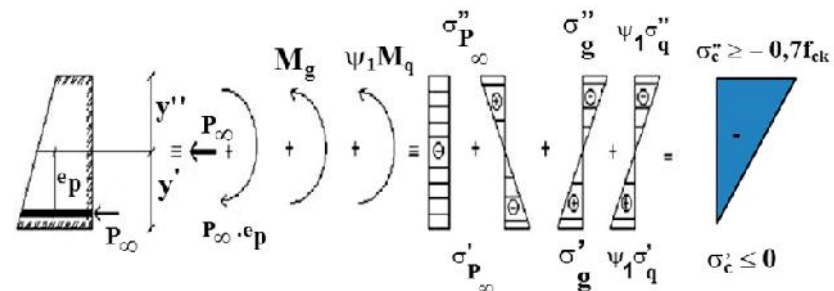


Figura 3 – Verificação ELS-D - Combinação Frequente, Protensão Completa.

Nota-se também a importância de verificar o ELS-CE que consiste no estado em que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido, usual no caso do concreto protendido na ocasião da aplicação da protensão.

Foi utilizado o cálculo manual e o também o cálculo utilizando uma ferramenta computacional para verificação das análises estruturais. A ferramenta computacional utilizada foi o ADAPT-Floor Pro 2015 cujo programa computacional foi desenvolvido para análise

avanzada e detalhada de estruturas em concreto armado e/ou protendido, realizada através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Armadura Mínima

Através da NBR 6118: 2014 a ruptura frágil das seções transversais, quando da formação da primeira fissura, deve ser evitada considerando-se, para o cálculo das armaduras, um momento mínimo dado pelo valor correspondente ao que produziria a ruptura da seção de concreto simples, supondo que a resistência à tração do concreto seja dada por $f_{ctk,sup}$. Seguindo a premissa da normativa brasileira citada acima a armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados ou protendidos deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo dado pela expressão da equação (1), respeitada a taxa mínima absoluta de 0.15%.

$$Md, \min = 0.8 * W0 * f_{ctk,sup} \quad (1)$$

Onde:

$W0$ = módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada;

$f_{ctk,sup}$ = resistência característica superior do concreto à tração

Já na ACI 318 : 2014 existe claramente uma diferenciação no cálculo da armadura mínima para protensão aderente e não aderente, além da consideração para diversos elementos estruturais protendidos. Assim para vigas protendidas aderentes a quantidade total de As e Aps , deve ser adequada para desenvolver uma carga majorada de até 1.2 vezes a carga de fissuração calculada com base no fr , lembrando que As é a armadura passiva, Aps a armadura ativa e fr o módulo de ruptura do concreto. Essa condição pode ser verificada de acordo com a equação (2).

$$wMd \geq 1.2 * Mr \quad (2)$$

Onde:

\emptyset = fator de redução = 0.9 (elemento tracionado)

Md = Momento máximo de cálculo

Mr = Momento de fissuração

Para vigas com protensão não aderente, o mínimo de área no reforço passivo longitudinal As, \min pode ser encontrado na equação (3).

$$As, \min = 0.004 * A_{ct} \quad (3)$$

Onde:

A_{ct} = parte da área da seção transversal entre face tracionada e o centroide da seção bruta.

Nesse artigo foi considerada somente a condição para validação da armadura mínima para vigas protendidas aderentes.

Levando em consideração as duas normativas citadas fica evidente que a NBR 6118:2014 impõe o uso de uma armadura mínima e a ACI 318:2014 deixa uma verificação conforme a



equação (2) que caso seja satisfeita não há a necessidade de colocação da armadura mínima. Porém para os autores desse artigo ainda existe outra sugestão que pode ser utilizada levando em conta tanto o momento de fissuração quanto o momento mínimo, e pode ser vista através da equação (4).

$$wMd \geq Mr + Md, \min \quad (4)$$

Onde:

\emptyset = fator de redução = 0.9 (elemento tracionado)

M_d = Momento máximo de cálculo

M_r = Momento de fissuração

$M_{d,\min}$ = Momento mínimo (de acordo com a equação (1))

Caso a equação (4) seja satisfeita então não existe a necessidade de colocação de armadura mínima e também vale lembrar que essa condição só é válida para pós-tração aderente.

Resultados

A partir dos resultados obtidos pelo cálculo manual e pela modelagem do software ADAPT-Floor Pro 2015, através do método de cálculo por elementos finitos, obteve-se os resultados conforme as tabelas 2 à 4, demonstrando em porcentagem as diferenças dos resultados.

Tabela 2 - Tensões na Viga com Protensão Limitada.

Protensão Limitada						
Dados		Cálculo manual		Cálculo ADAPT		%
Combinação Frequente - ELS-F						
P_{∞}		912,15	kN	912,2	kN	0,005%
Tensões	Borda inferior (σ')	3,04	N/mm ²	2,92	N/mm ²	-3,947%
	Borda superior (σ'')	6,83	N/mm ²	6,73	N/mm ²	-1,464%
Combinação Quase- Permanente - ELS-D						
P_{∞}		1083,87	kN	1083,9	kN	0,003%
Tensões	Borda inferior (σ')	0	N/mm ²	-0,11	N/mm ²	0,000%
	Borda superior (σ'')	4,508	N/mm ²	4,4	N/mm ²	-2,40%

Tabela 3 - Tensões na Viga com Protensão Completa.

Protensão Completa

Dados		Cálculo manual	Cálculo ADAPT	%
Combinação Frequente -ELS-D				
P ∞		1361,78 kN	1361,8 kN	0,001%
Tensões	Borda inferior (σ') máx	0 N/mm ²	-0,12 N/mm ²	0,000%
	Borda superior (σ'') mín	5,66 N/mm ²	5,55 N/mm ²	-1,943%
Combinação Rara - ELS-F				
P ∞		1606,93 kN	1606,9 kN	0,002%
Tensões	Borda inferior (σ')	3,04 N/mm ²	2,91 N/mm ²	-4,28%
	Borda superior (σ'')	9,72 N/mm ²	9,6 N/mm ²	-1,235%

Tabela 4 - Armadura Passiva no ELU com Protensão Limitada.

Protensão Limitada + armadura passiva no ELU	
Cálculo Manual	Cálculo ADAPT
10 cordoalhas Ø 12.7mm + 13,34 cm ² de armadura passiva CA 50 ou seja, 7 barras de Ø 16 mm	10 cordoalhas Ø 12.7mm + 14,00 cm ² de armadura passiva CA 50 ou seja, 7 barras de Ø 16 mm

A figura 4 demonstra graficamente os resultados através do software ADAPT- Floor Pro 2015 para protensão limitada no ELU.

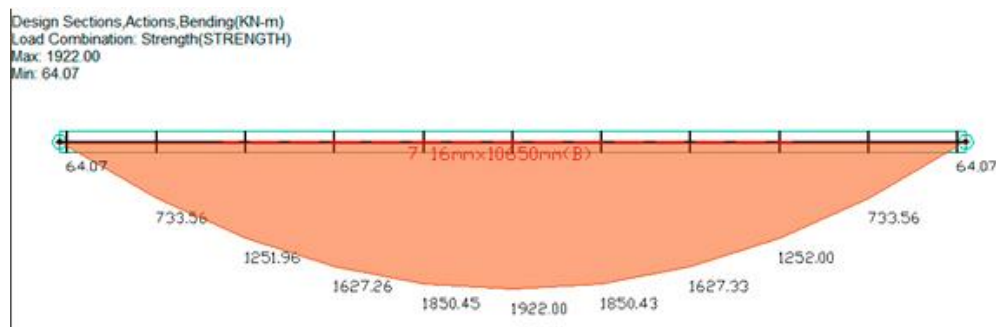


Figura 4 – Armadura Ativa e Passiva no ELU para Protensão Limitada

Na verificação do ELS e do ELU para protensão completa as armaduras ativas encontradas foram 14.54cm² e 14.97cm², respectivamente, ou seja 15 cordoalhas de Ø12.7 mm. Assim na verificação do ELU somente a armadura ativa seria necessário para combater os esforços, mas como vimos durante o artigo torna-se obrigatório a utilização de armadura mínima. Sendo assim a tabela 5 mostra os valores encontrados para armadura mínima levando em consideração o $M_{d,min}$ e também os valores de ρ_{min} de 0.15% todos de acordo com a NBR 6118:2014.



Tabela 5 - Armadura Passiva Mínima

Armadura Passiva Mínima	
Cálculo com $\min = 0.15\%$	Cálculo com M_d, \min
7.20 cm ² de armadura passiva CA 50 ou seja, 4 barras de Ø 16 mm	5.88 cm ² de armadura passiva CA 50 ou seja, 3 barras de Ø 16 mm

Os resultados através da equação (2) de acordo com a ACI 318:2014 são apresentados abaixo:

$$wM_d \geq 1.2 * M_r$$

$$0.9 * 1939.88kN * m \geq 1.2 * 1336.83kN * m$$

$$1745.89kN * m > 1604.20kN * m \text{ --- } > OK!$$

Assim nesse caso não existe a necessidade de armadura mínima passiva adicional, somente a armadura ativa aderente torna-se suficiente.

Os resultados através da equação (4) referem-se a sugestão dos autores desse artigo e podem ser vistos abaixo:

$$wM_d \geq M_r + M_d, \min$$

$$0.9 * 1939.88kN * m \geq 1336.83kN * m + 290kN * m$$

$$1745.89kN * m > 1626.83kN * m \text{ --- } > OK!$$

Nesse caso proposto pelos autores desse artigo também não existe a necessidade de armadura mínima passiva adicional, somente a armadura ativa aderente. Portanto levando em consideração as duas metodologias observa-se uma diferença de 1.41%.

Conclusões

Foram realizados os cálculos para a viga protendida de seção retangular, verificando o Estados-Limite de Serviço (ELS) e Último (ELU), sistema pós-tração aderente com o uso de protensão limitada e protensão completa, com cálculos manualmente e pelo software ADAPT-Floor Pro 2015 de acordo com NBR 6118:2014 obtendo-se resultados equivalentes e próximos. Assim pode-se concluir que o software apresentou resultados confiáveis quando a modelagem estrutural foi válida, ressaltando que o ADAPT não contém as combinações da norma brasileira, assim sendo foram devidamente inseridas as combinações da NBR 6118:2014 no programa, bem como outros critérios. Também vale ressaltar que esse procedimento não foi uma dificuldade, e manipular os critérios avançados do programa mostrou que o usuário pode modelar estruturas personalizadas com liberdade.

Constatou-se que para o cálculo da armadura mínima passiva em vigas de acordo com a NBR 6118:2014 não existe uma distinção entre utilização de protensão aderente e não aderente, já na ACI 318-14 existe tal separação, com equações distintas para cada caso.

Na NBR 6118:2014 embora o $M_{d,\min}$ possa ser utilizado para calcular a armadura mínima existe a taxa mínima absoluta de 0.15% que deve ser respeitada.



Pode-se afirmar que as abordagens através da ACI 318:2014 e da equação sugerida nesse artigo demonstraram resultados muito próximos diferindo em apenas 1.41%, o que mostra que a equação sugerida pode se tornar um parâmetro de referência.

Com relação aos níveis de protensão fica evidente que a equação (4) proposta nesse artigo deve ser utilizada preferencialmente para protensão completa, onde a força de protensão torna-se maior aproveitando de maneira mais eficiente o aço de protensão.

Espera-se que esse trabalho seja uma base para outros trabalhos futuros no tocante a avaliação de armaduras mínimas para protensão não aderente de vigas protendidas, assunto não contemplado nesse artigo.

Diante de todo contexto os autores possuem o desejo de validar a parte teórica apresentada para armadura mínima transformando-a em experimental num futuro próximo através de ensaios em laboratório.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Projeto de estruturas de concreto: Procedimentos", NBR 6118/ 2014. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação", NBR 7483:2008. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Ações e segurança nas estruturas - Procedimento", NBR 8681:2003. Rio de Janeiro.

ADAPT – "ADAPT-Floor Pro- Análise avançada e detalhamento de estruturas em concreto armado e/ou protendido", Folder 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-14 Reported by ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, 2014.

ARCELORMITTAL-"Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido Catalogo", março 2015.

CHOLFE, L., BONILHA, L. A. S. –"Concreto Protendido Teoria e Prática". Escola de Engenharia Mackenzie, São Paulo sd 44 p, 2013.

CHUST, R. C.- "Estruturas Em Concreto Protendido" - Pós-tração, Pré-tração Cálculo e Detalhamento; Vol. 1, editora PINI, 431 p., 2012.

DOXSEY, J.R. – Metodologia de pesquisa científica, ESAB- Escola Superior Aberta do Brasil, São Paulo, 2009.

LOUREIRO, G. – Exemplos de aplicação dos conceitos das seções 17 e 19. Dimensionamento à flexão de lajes e vigas protendidas no ELU, ABNT NBR 6118:2014 – Comentários e Exemplos de Aplicações. Ed. Ibracon, 2015.

ZIA, P., PRESTON, H.K., SCOTT, N.L. and WOLKMAN, E.B., "Estimating Prestress Losses", June, 1979, pp. 32-38.