

ESTUDO SOBRE A TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS EM ELEMENTOS PRÉ-TRACIONADOS

Rodrigo Mattar Riemke¹; Angelo Rubens Migliore Junior²; Fábio Albino de Souza³

¹ Pós-Graduando do curso de Especialização em Estruturas Protendidas do Instituto IDD; rodrigoriemke@gmail.com

² Professor Doutor do curso de Especialização em Estruturas Protendidas do Instituto IDD; rubens.migliore@gmail.com

³ Mestre em Engenharia de Estruturas, Unicamp / IDD / EBPX / Departamento de Estruturas - DES; fabio@ebpx.com.br

Resumo

O dimensionamento de estruturas em concreto protendido requer a devida atenção a pontos críticos onde podem ocorrer picos de tensões distribuídas de forma não homogênea. A região de transferência de esforços em elementos protendidos pré-tracionados é um caso particular a ser analisado devido à alta variabilidade das tensões de ligação e a incerteza quanto aos fatores que regem o seu comportamento estrutural. Neste artigo são apresentados os mecanismos de transferência de esforços entre as cordoalhas protendidas e o concreto, suas relevâncias e seus efeitos. São introduzidas as disposições normativas vigentes a respeito do tema, bem como a literatura tradicional e os estudos mais recentes no âmbito do comportamento das regiões de extremidade em elementos pré-tracionados. Equações propostas em normas brasileira, americana e europeias são comparadas com os resultados obtidos em estudos, apresentando-se uma ampla descrição dos fatores que influenciam o comprimento de transferência, de forma a explicitar suas limitações e conformidades. Verificou-se que, salvo em algumas condições específicas de reduzidos cobrimentos e espaçamentos, os valores normativos são adequados. Por fim, são apresentadas as principais formas de falhas que ocorrem devido à introdução das forças de protensão e são propostos dois métodos para o dimensionamento de reforços de extremidade em elementos pré-tracionados, de acordo com a literatura abordada.

Palavras-Chave: Concreto Pré-tracionado; Transferência de Esforços; Comprimento de Transferência.

Abstract

The design of prestressed concrete structures requires due attention to critical points where heterogeneous spikes in tension are likely to occur. The transfer region in pretensioned concrete members is a particular case to be analyzed because of the high variability in bond stresses and the uncertainties about the factors that regulate its structural behavior. This article presents the mechanisms of force transfer between the pretensioned tendons and the concrete, the relevance of each mechanism and its effects. Current normative dispositions on the subject are introduced, as well as the traditional literature and recent studies within the scope of end-zone behavior in prestressed elements. The equations proposed in Brazilian, American and European standards are compared to results obtained in studies, and an ample description of the factors that influence the transfer length is presented, pointing out their limitations and conformities. It was verified that, with the exception of specific conditions of reduced cover and spacing, the normative values are adequate. Finally, the main mechanisms of failure due to the introduction of prestress forces are presented and two methods of end-zone reinforcement are proposed in accordance to the literature.

Keywords: Pretension Concrete; Stress Transfer; Transfer Length

1 Introdução

A utilização de estruturas pré-fabricadas desempenha um papel cada vez mais importante no cenário moderno da construção civil. Essa tecnologia permite acelerar os processos construtivos e melhorar a qualidade final do produto com controles de qualidade e logísticos mais eficientes ao longo de toda a cadeia produtiva. O uso racional e otimização das propriedades dos materiais oferece resultados positivos economicamente, bem como possibilita melhores respostas para questões de sustentabilidade ambiental.

Estreitamente associado aos avanços nas técnicas de pré-fabricação, está o uso do concreto protendido pré-tracionado, o qual requer dos engenheiros estruturais elevada atenção aos mecanismos de funcionamento e de interação entre os materiais. O uso de novas técnicas e novos tipos de concreto e de aço é mais facilmente implantado no ambiente industrial e, conforme os materiais são exigidos mais proximamente aos seus limites, áreas onde se tem um déficit de conhecimento tenderão a se tornar entraves e focos de problemas. Neste contexto, o aprofundamento e difusão do conhecimento acerca do fenômeno de ligação entre o aço de protensão e o concreto (ancoragem) se faz essencial para o avanço da tecnologia da construção com garantias de durabilidade e segurança das estruturas.

Para a ancoragem dos cabos protendidos em estruturas pós-tracionadas, são empregados dispositivos de ancoragem que geram cargas definidas distribuídas em uma determinada área da superfície do concreto, de acordo com o sistema adotado. No caso de elementos de concreto em que se utilizam cordoalhas pré-tracionadas (concreto protendido com aderência inicial), a transferência da força de protensão se dá exclusivamente pelas tensões de aderência geradas entre as cordoalhas e o concreto que as envolve. Essas tensões são influenciadas por inúmeros fatores, dos quais muitos são insuficientemente compreendidos e poucos são levados em consideração na prática.

A introdução de esforços, através da ancoragem das cordoalhas de protensão, gera, na extremidade do elemento, uma zona de distribuição não uniforme de tensões (as quais não podem ser calculadas pela Resistência dos Materiais), denominada região de perturbação de St. Venant (LEONHARDT e MÖNNIG, 2008b). O mecanismo de ancoragem das cordoalhas é, em parte, semelhante ao das barras nervuradas convencionais de concreto armado, no entanto, a força a ancorar é de 3 a 4 vezes maior no caso das cordoalhas protendidas (LEONHARDT e MÖNNIG, 2008c). O equilíbrio dessas forças produz, nas regiões de transferência e regularização de esforços, elevadas tensões de tração e de fendilhamento radial, sendo comum a ocorrência de patologias que podem comprometer a estrutura, seja por perda de ancoragem, vulnerabilidades à corrosão ou à própria falha do elemento no ato de protensão.

2 Forças de Aderência no Concreto Protendido Pré-Tracionado

De acordo com Oh e Kim (2000), a qualidade mais importante do concreto protendido pré-tracionado é a sua capacidade de transmitir adequadamente a força de protensão entre as cordoalhas e o concreto. As tensões de aderência na ligação são responsáveis por levar a tensão nas cordoalhas de zero junto à borda do elemento, até a tensão total de protensão, no final do comprimento de transferência.

Tensões de aderência surgem sempre que houver variações de tensão no aço (LEONHARDT e MÖNNIG, 2008a) e não são constantes ao longo do comprimento de transferência (DERKOWSKI e DYBA, 2017). A força presente na ligação é resultado da sobreposição de diferentes mecanismos de interação entre o aço e o concreto, usualmente definidos como: adesão, atrito, engrenamento mecânico e efeito Hoyer.

2.1 Adesão

Força de ligação química e física entre o aço e o cimento no nível microscópico. Pode também ser compreendido como um efeito de colagem, o qual depende da rugosidade e da limpeza da superfície das armaduras (LEONHARDT e MÖNNIG, 2008a). Representa uma parcela muito pequena das forças de ligação e se extingue com o escorregamento da armadura.

2.2 Atrito

É definido como uma força de resistência aos deslocamentos, a qual surge na presença de forças de compressão perpendiculares ao sentido do deslocamento. Durante o processo de cura, o fenômeno de retração do concreto gera forças de compressão perpendiculares ao eixo das armaduras, resultando no efeito de atrito.

2.3 Engrenamento Mecânico

As forças de ligação devidas ao engrenamento mecânico se devem à conformação geométrica superficial das armaduras. Em barras de aço nervuradas, o denteamento entre o concreto e as nervuras impede, por resistência ao cisalhamento, o deslocamento relativo das armaduras. No caso das cordoalhas de protensão de múltiplos fios, este efeito ocorre devido à disposição helicoidal dos fios externos e depende do impedimento ao giro da cordoalha durante o escorregamento (DUMÊT e PINHEIRO, 2007).

2.4 Efeito Hoyer

A força de aderência denominada de efeito Hoyer ocorre exclusivamente em elementos pré-tracionadas. Quando os cabos protensão são tracionados, o seu diâmetro diminui devido ao efeito de Poisson. O oposto tende a ocorrer quando os mesmos são liberados após a concretagem do elemento. Dessa forma, na extremidade, onde o cabo está livre, o seu diâmetro retorna ao original, enquanto no interior do elemento, onde a força de protensão já se desenvolveu (além do comprimento de transferência), o diâmetro permanece reduzido. Na faixa de transferência de esforços, o diâmetro do cabo varia de acordo com a tensão estabelecida. A tendência dos cabos de retornar ao seu diâmetro original gera forças de compressão radial contra o concreto, resultando em um aumento substancial nas forças de atrito (DERKOWSKI e DYBA, 2017).

Briere et al. (2013) identificaram que em cordoalhas de fios múltiplos, com distribuição helicoidal, há uma contribuição adicional às forças de ligação atribuída ao efeito Hoyer. Durante a tração das cordoalhas, os fios externos tendem a se “desenrolar” ao redor do eixo. Ao serem liberados, os fios tendem a retornar as posições iniciais, gerando forças de contato adicionais com o concreto envolvente. As tensões verificadas em cordoalhas devidas ao efeito Hoyer foram de 25% a 40% superiores daquelas esperadas para fios, considerando o efeito de Poisson.

3 Comprimentos de Transferência e Ancoragem

Na ausência de dispositivos específicos de ancoragem, a transmissão da força de protensão da armadura ativa se dá gradualmente, pelas tensões de aderência, até atingir o valor máximo. O conceito

de comprimento de transferência restringe-se às interações entre as propriedades do concreto e da armadura de protensão, independente de carregamentos externos. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define o comprimento de transferência como “o comprimento necessário para transferir, a totalidade da força de protensão ao fio, no interior da massa de concreto”, enquanto em medições práticas de estudos científicos costuma-se adotar a distância entre a extremidade do elemento até o ponto em que se atinge 95% da deformação máxima causada pela aplicação da força de protensão.

Segundo Hegger e Bertram (2010, apud DERKOWSKI e DYBA, 2017), para a análise do comprimento de transferência, considera-se uma situação de ligação sob pressão (push in), onde a cordoalha tende a se expandir radialmente contra o concreto. Esse conceito difere na análise do comprimento de ancoragem, o qual deve ser considerado em uma situação de arrancamento (pull out), uma vez que a introdução de cargas externas aumenta a tensão nas cordoalhas, fazendo com que seu diâmetro diminua. Dumêt e Pinheiro (2007) fazem referência a esses conceitos ao alertar para o risco de ruptura caso a “onda de aderência” devida aos carregamentos externos atinja a zona de transferência, particularmente em peças curtas ou com carregamentos próximos aos apoios.

3.1 Considerações Normativas

As principais normas internacionais e nacional diferem nos fatores considerados para a determinação dos comprimentos de transferência, assim como propõem coeficientes diferentes, gerando, portanto, resultados qualitativamente e quantitativamente distintos.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta as seguintes formulações para a determinação do comprimento de transferência:

Para fios denteados ou lisos:

$$l_{bpt} = 0,7l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (1)$$

Para cordoalhas de três ou sete fios:

$$l_{bpt} = 0,5l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (2)$$

Onde, σ_{pi} é a tensão na armadura, em MPa, imediatamente após a aplicação da protensão e l_{bp} é o comprimento de ancoragem básico, dado para fios isolados:

$$l_{bp} = \frac{\phi f_{pyd}}{4 f_{bpd}} \quad (3)$$

E para cordoalhas de três ou sete fios:

$$l_{bp} = \frac{7\phi f_{pyd}}{36 f_{bpd}} \quad (4)$$

Sendo, f_{bpd} a resistência de aderência entre o concreto, em MPa, e a armadura ativa:

$$f_{bpd} = \eta_{p1}\eta_{p2}f_{ctd} \quad (5)$$

Ainda, os resultados das equações (1) e (2) devem ser multiplicados por 1,25 caso a liberação da protensão não seja gradual, o coeficiente η_{p1} é igual a 1,0 para fios lisos; 1,2 para cordoalhas de três ou sete fios e; 1,4 para fios dentados, enquanto o coeficiente η_{p2} está relacionado com as situações de boa ou má aderência.

O equacionamento da NBR 6118 (ABNT, 2014) é o mesmo apresentado no Model Code 2010 (CEB, 2012), com exceção de uma ponderação para o tipo de ação a ser verificada presente no segundo, o qual prevê a multiplicação do comprimento de transferência por um coeficiente α_2 igual a 0,5 caso estejam sendo verificados os esforços transversais na zona de ancoragem.

A concepção apresentada no Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) também assemelha-se àquela disposta na NBR 6118 (ABNT, 2014) e no Model Code 2010 (CEB, 2012), no entanto, diverge significativamente nos coeficientes utilizados. Segundo Eurocódigo 2 (IPQ, 2010), o comprimento de transferência básico é obtido pelo seguinte equacionamento:

$$l_{bp} = \frac{\alpha_1\alpha_2\phi\sigma_{pi}}{f_{bpd}} \quad (6)$$

Em que, o coeficiente α_1 relaciona-se com o tipo de liberação do dispositivo de protensão (1,0 caso seja gradual e; 1,25 caso seja súbita) e α_2 com o tipo de seção da armadura (0,25 para armaduras circulares e; 0,19 para cordoalhas de três ou sete fios). O valor de σ_{pi} é a tensão na armadura em MPa imediatamente após a liberação e f_{bpd} é a tensão de aderência entre a armadura e o concreto, em MPa, dada por:

$$f_{bpd} = \eta_{p1}\eta_1f_{ctd}(t) \quad (7)$$

Onde, η_{p1} leva em conta o tipo de armadura de protensão (2,7 para fios indentados e; 3,2 para cordoalhas de três ou sete fios) e o coeficiente η_1 está relacionado com as situações de boa ou má aderência. Ainda, o Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) leva em consideração o tipo de ação a ser verificada, devendo o comprimento de transferência básico, l_{bp} , ser multiplicado por 1,2 ou 0,8, qual sendo o mais desfavorável.

O ACI-318 (ACI, 2014), por sua vez, propõe um modelo de cálculo distinto para a determinação do comprimento de transferência, obtido pela seguinte equação:

$$l_{bpt} = \left(\frac{\sigma_{p\infty}}{20,7}\right)\phi \quad (8)$$

Em que $\sigma_{p\infty}$ é a tensão efetiva na armadura de protensão após todas as perdas, em MPa, e ϕ é o diâmetro nominal da armadura. Para o cálculo da resistência ao esforço cortante, a norma norte-americana (ACI, 2014) estipula o comprimento de transferência de 50 diâmetros para cordoalhas e 100 diâmetros para fios.

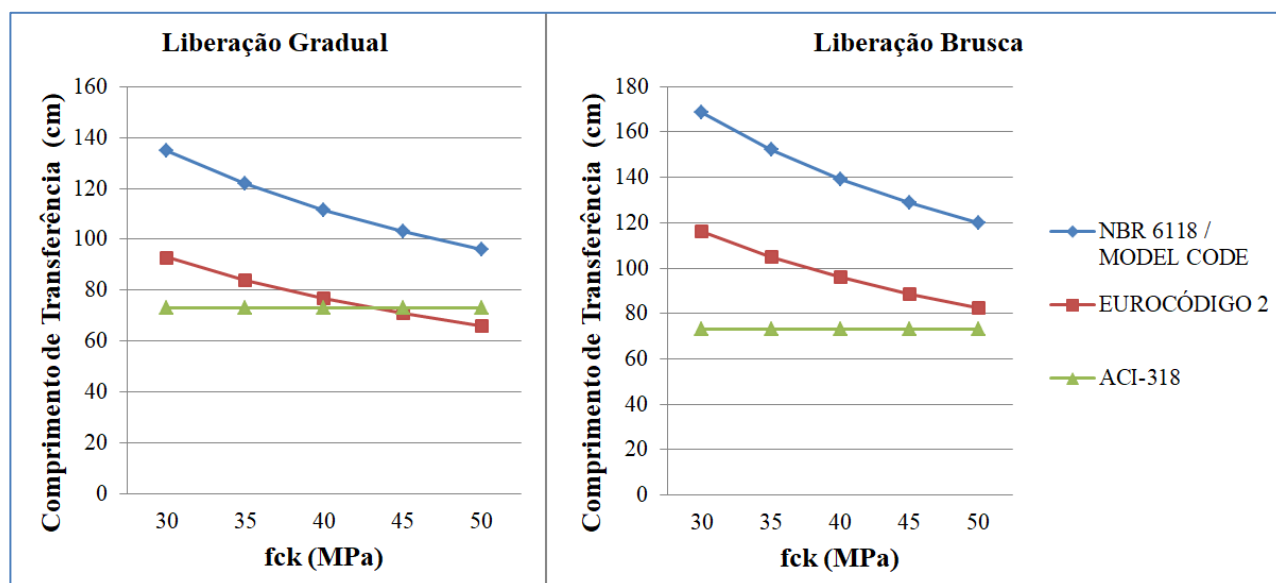


Figura 1 – Comprimentos de transferência segundo as normas (fonte: autor)

A análise de resultados obtidos através das formulações normativas, apresentados no gráfico da figura 1, permite observar que a NBR 6118 (ABNT, 2014), em consonância com o Model Code 2010 (CEB, 2012), leva aos valores mais conservadores para o comprimento de transferência em todos os casos, excedendo em 45% os valores obtidos pelo Eurocódigo 2 (IPQ, 2010). Enquanto o ACI-318 (ACI, 2014) propõe os valores menos conservadores, com a exceção de situações com utilização de concretos de resistências elevadas e liberação gradual do dispositivo de protensão, nas quais o Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) é menos conservador. Para a análise, foram consideradas cordoalhas de 7 fios e 12,7 mm de diâmetro e perdas de 20%.

Observa-se também que o ACI-318 (ACI, 2014) leva em consideração para a determinação do comprimento de transferência apenas a tensão no aço de protensão e o diâmetro da armadura. Já as demais normas, além desses fatores, consideram a resistência do concreto, a forma de liberação do dispositivo de protensão e o tipo da armadura. Conforme será disposto a seguir, as considerações das normas brasileira e europeias estão em maior concordância, ao menos qualitativamente, com o verificado em estudos sobre a transferência de esforços entre a armadura ativa e o concreto, os quais identificam que uma vasta quantidade de fatores influencia os resultados obtidos.

3.2 Fatores que Influenciam a Transferência de Esforços

Estudos a respeito da transferência de esforços em elementos protendidos pré-tracionados tem identificado inúmeros fatores que afetam o comportamento da ligação entre as armaduras ativas e o concreto, contribuindo progressivamente para o conhecimento sobre este assunto. Como visto, algumas dessas condições são levadas em consideração nas normas, enquanto outras ainda são ignoradas.

O método de liberação do dispositivo de protensão já é considerado nas formulações da maioria das normas, com exceção do ACI-318 (ACI, 2014), que apenas faz menção nos seus comentários. O impacto causado pelo corte súbito da armadura ativa, especialmente na primeira extremidade de corte, predispõe ao surgimento de fissuras na zona de ancoragem que prejudicam a ligação. Estudos realizados até hoje, como por Oh e Kim (2000), Kim et al. (2016) e, Derkowski e Dyba (2017), são

bastante consistentes quanto a este quesito, verificando um aumento no comprimento de transferência em casos de liberação súbita de 13% a 22%. Ainda, quando utilizadas cordoalhas de aço CP-240, o aumento no comprimento de transferência devido à liberação súbita tende a ser maior se comparado com cordoalhas CP-190 (KIM et al, 2016), sugerindo que, com o aumento da resistência do aço das cordoalhas, seja preciso revisar o coeficiente majorador (atualmente igual a 1,25) ou mesmo restringir a liberação súbita para tensões mais elevadas.

Também considerado na maioria das normas, com exceção do ACI-318 (ACI, 2014), a resistência do concreto tem grande influência no comprimento de ancoragem. A resistência do concreto está diretamente relacionada com a capacidade de desenvolvimento de tensões na ligação entre o aço e concreto, sendo que, para concretos de maior resistência, maiores tensões são alcançadas. Dessa forma, o comprimento necessário para a transmissão total dos esforços diminui conforme se aumenta a resistência do concreto. A validade dessa correlação permanece, inclusive, para concretos de alta resistência, como verificaram Kim et al. (2016) para concretos de classe C80 e Oh et al. (2014) para concretos de classe C60.

As características da armadura de protensão como o diâmetro e o seu tipo (fio ou cordoalha), bem como a tensão inicial aplicada também exercem grande influência no comprimento de transferência e são levados em consideração por todas as normas avaliadas (excetuando-se o tipo de armadura, que não é considerado no ACI-318). Oh e Kim (2000) e Oh et al. (2014) verificaram, respectivamente, que a utilização de cordoalhas de diâmetro 15,2 mm acarreta em comprimentos de transferência 25% e 30% maiores do que quando utiliza-se cordoalhas de 12,7 mm, para o mesmo concreto e mesma tensão – aumentos, portanto, marginalmente maiores do que o aumento linear, medido pelo diâmetro, considerado nas normas. Já a tensão inicial no aço tende a afetar o comprimento de transferência em uma proporção quadrática (OH et al, 2014) e não linear, conforme proposto nas normas. Embora, esta correlação não tenha sido replicada nos estudos de Kim et al. (2016), onde observou-se uma variação na correlação tensão/comprimento de transferência dependente de outros fatores, como a forma de liberação e a resistência do concreto, indicando para a necessidade de mais estudos.

O tipo de armadura, por sua vez, afeta o comprimento de transferência através dois fenômenos: primeiramente, o coeficiente de atrito entre o aço e o concreto varia conforme a configuração superficial da armadura, sendo representado na NBR 6118 (ABNT, 2014), no Model Code 2010 (CEB, 2012) e no Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) pelo coeficiente η_{p1} e; conforme observaram Briere et al. (2013), o efeito Hoyer é exacerbado em cordoalhas de múltiplos fios, o que também aumenta as tensões de ligação. Este segundo fenômeno é materializado normativamente no coeficiente α_2 do Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) e na diferença entre os coeficientes dispostos nas equações (3) e (4) para a NBR 6118 (ABNT, 2014) e o Model Code 2010 (CEB, 2012).

Além dos fatores dispostos anteriormente, os quais são levados em consideração na maioria das normas, estudos tem verificado que é preciso dar atenção a outros quesitos quando se avalia a ancoragem e o comprimento de transferência de cabos pré-tracionados, sob o risco de ocorrência de patologias e de subestimar os valores reais. Entre os fatores que devem ser observados, identifica-se o espaçamento entre cabos, o cobrimento da armadura ativa, o uso de fibras ou aditivos, o uso de concreto leve ou auto adensável, entre outros.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) restringe a distância livre entre cordoalhas ao valor mínimo igual a 2 diâmetros (desde que seja suficiente para a passagem dos agregados e; nunca menor do que 2cm). Nessa linha, o efeito do espaçamento entre cordoalhas foi analisado por Oh e Kim (2000), verificando-se um aumento consistente nos valores do comprimento de transferência com a aproximação das cordoalhas. Tendo como base a distância livre entre cordoalhas de 3 diâmetros, o afastamento das cordoalhas para 4 diâmetros resultou em uma pequena diminuição do comprimento

de transferência de cerca de 5%, já a aproximação para 2 diâmetros de distância livre ocasionou um aumento médio de 20% no comprimento de transferência. Embora no estudo em questão (OH e KIM, 2000), os resultados tenham ficado dentro dos valores de norma, observa-se que espaços livres menores do que 3 diâmetros afetam significativamente a transferência de esforços.

Os dados apresentados por estudos a respeito do efeito do cobrimento da armadura ativa sob o comprimento de transferência são bastante consistentes. Derkowski e Dyba (2017) destacam que para cobrimentos menores do que 3 diâmetros, a falha no elemento tende a ocorrer por fendilhamento ao redor da cordoalha na zona de ancoragem devido, principalmente, ao efeito Hoyer. Na mesma linha, Hegger e Bertam (2008), estudando concretos de alto desempenho, verificaram que, para cobrimentos menores do que 2,5 vezes o diâmetro do cabo, as tensões transferidas nas ligações apresentaram reduções de 10 a 30%. Neste estudo, apenas para cobrimentos iguais ou maiores do que 2,5 diâmetros foi possível aplicar a totalidade da força de protensão sem o surgimento de fissuras visíveis. Como consequência, a diminuição dos cobrimentos das armaduras ativas produz uma tendência clara de aumento dos comprimentos de transferência (OH e KIM, 2000) e os valores de cobrimentos mínimos propostos na NBR 6118 (ABNT, 2014) podem deixar de serem conservadores, quando analisado sob este aspecto, especialmente, para cordoalhas de maiores diâmetros.

Na busca por maximizar as qualidades dos materiais, também tem se estudado o uso de fibras e aditivos em estruturas de concreto protendido com aderência inicial. Kim et al. (2016), estudando o uso de fibras de aço em taxas volumétricas de 0,38% e 0,76%, verificaram que o uso de fibras reduz significativamente o comprimento de transferência na extremidade de liberação súbita das cordoalhas. Supõe-se que isso se deva à contribuição das fibras em evitar a fissuração devida ao impacto da cordoalha. No entanto, foi observado um aumento no comprimento de transferência no lado de liberação gradual para taxas de fibras de 0,76%, sugerindo que o excesso de fibras pode ser prejudicial à ligação entre o concreto e a cordoalha de protensão. Apesar da necessidade de mais estudos específicos, a explicação proposta por Kim et al. (2016) pode elucidar os resultados obtidos por Hegger e Bertam (2008), que não verificaram efeitos significativos no uso de fibras de aço em testes de arrancamento para taxas mais elevadas (0,9%, 1,04% e 2,5%).

Jalal et al. (2019) observaram que o uso de fibras pode ser bastante promissor e obter resultados satisfatórios naquilo que se propõe – compensar o comportamento frágil de concretos de alta resistência e reduzir a necessidade de armaduras de reforço. No entanto, gera novos problemas a serem solucionados como a corrosão das fibras expostas e a drástica perda na trabalhabilidade do concreto. No mesmo estudo, identificaram prejuízos significativos no uso de cinza pozolânica no concreto protendido, com o surgimento de fissuras quando aplicada cerca de 70% da força de protensão. Essa ocorrência deve-se ao fato de a reação pozolânica ocorrer apenas a partir dos 28 dias, ou seja, muito após a data de aplicação da protensão. Dybel e Furtak (2014, apud DERKOWSKI e DYBA, 2017), por sua vez, estudaram o efeito do uso de sílica e plastificantes no concreto. Relataram que taxas de sílica de até 5% aumentaram a rigidez da ligação, no entanto, para taxas de 10% ou maiores, o efeito foi inverso. Enquanto o uso de plastificantes na mistura de concreto se mostrou positivo para a melhor eficiência da ligação.

A utilização de concretos leves e auto adensáveis já foi considerada em alguns estudos: Peterman (2007) destacou a necessidade de atenção no uso de concretos auto adensáveis, especialmente para região de má-aderência, onde o comprimento de transferência é significativamente aumentado. Vásquez-Herrero et al. (2013) desencorajam o uso de concretos leves em elementos pré-tracionados devido a menor resistência a tensões de tração e a baixa energia de fraturação. Essas características tornam a ligação mais frágil, com pouca ductilidade após o escorregamento das cordoalhas, aumentando significativamente a ocorrência de fissuras por fendilhamento. Ademais, Dang et al.

(2017) identificaram que concretos leves auto adensáveis acarretam em comprimentos de ancoragem aumentados devido à redução nas forças de ligação.

Sabe-se, ainda, que o comprimento de transferência varia em função do tempo devido, principalmente, aos efeitos que fluência e retração do concreto acarretam no efeito Hoyer (KAREEM et al., 2019), no entanto, os resultados obtidos variam drasticamente. Em diferentes estudos, foram observadas variações de 6% a 17% nos primeiros 28 dias (DANG et al., 2016); 5% em 90 dias (OH e KIM, 2000); 8% a 18% em 250 dias (MOHANDOSS et al., 2019); 22% a 40% nos primeiros 360 dias e permanecendo constante após esta data (KAREEM et al., 2019). Caro et al. (2013) destaca que alguns estudos já identificaram aumentos de 190% no comprimento de transferência, enquanto outros registraram inclusive reduções. Até o momento, não foi possível estabelecer padrões para a variação no comprimento de transferência ao longo do tempo, a qual pode divergir até mesmo para extremidades da mesma peça, recomendando-se um fator de majoração único de 1,2 (CARO et al., 2013; DANG et al., 2016).

3.3 Validação dos Valores Normativos

Como visto anteriormente, as normas aqui abordadas não contemplam plenamente os fatores que influenciam a ligação entre as armaduras ativas e o concreto em elementos pré-tracionados. A tabela 1 resume os fatores citados, seu efeito no comprimento de transferência e a consideração ou não nas equações normativas. Cabe ressaltar, que alguns fatores, como o cobrimento e o espaçamento entre armaduras, embora não sejam considerados nas equações de comprimentos de transferência e ancoragem, são limitados pelas normas por razões distintas.

Devido ao alto grau de incertezas que envolve o comportamento das ligações em elementos pré-tracionados, apesar de não considerarem diversos fatores, as normas tendem a ser conservadoras em suas estimativas. Couto Filho e Della Bella (2005) verificaram que a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta valores adequados, como exceção de situações com cobrimentos ou espaçamentos muito reduzidos, nas quais ela pode deixar de ser conservadora.

A equação proposta pelo ACI-318 (ACI, 2014) pressupõe uma tensão de ligação constante de 2,7 MPa ao longo do comprimento de transferência. Essa equação é conservadora se a resistência do concreto no momento da liberação for maior ou igual a 20 MPa (DANG et al., 2015). Em concordância, Kim et al. (2016) concluíram que o ACI-318 (ACI, 2014) apresenta resultados conservadores na ordem de 4 desvios-padrão para cordoalhas CP-240 e concretos acima de 50 MPa, e o Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) leva a valores de 2 a 3 desvios-padrão acima para os mesmos casos. Dang et al. (2016) também verificou que as equações do ACI-318 (ACI, 2014) são válidas para cordoalhas de 18 mm de diâmetro.

Por mais sofisticado que seja o modelo de cálculo para estimar o comportamento da ligação das armaduras ativas com o concreto, há sempre um grau de incerteza intransponível nas propriedades dos materiais e no processo executivo. Por tal motivo, alguns testes podem ser realizados, em especial no ambiente fabril. Dang et al. (2014) e Vásquez-Herrero et al. (2013) propõe a realização de testes de arrancamento com amostras dos materiais utilizados para quantificar as propriedades de aderência e, com esses dados, ponderar os valores de comprimento de transferência e ancoragem, estabelecendo limites máximos e mínimos.

Tabela 1 – Fatores que afetam o comprimento de transferência (C.T. = comprimento de transferência).

FATOR	EFEITO	NBR 6118 (ABNT, 2014)	ACI 318 (ACI, 2014)	EC 2 (IPQ, 2010)	MODEL CODE (CEB, 2012)
Liberção Abrupta do Dispositivo	Aumenta C.T.	Considera	Não Considera	Considera	Considera
Resistência do Concreto	Reduz C.T.	Considera	Não Considera	Considera	Considera
Tensão na Armadura Ativa	Aumenta C.T.	Considera	Considera	Considera	Considera
Tipo de Armadura Ativa	Variável	Considera	Não Considera	Considera	Considera
Diâmetro da Armadura Ativa	Aumenta C.T.	Considera	Considera	Considera	Considera
Diminuição do Espaçamento entre Cabos	Aumenta C.T.	Não Considera	Não Considera	Não Considera	Não Considera
Diminuição do Cobrimento da Armadura Ativa	Aumenta C.T.	Não Considera	Não Considera	Não Considera	Não Considera
Uso de Fibras ou Aditivos	Variável	Não Considera	Não Considera	Não Considera	Não Considera
Uso de Concreto Leve	Aumenta C.T.	Não Considera	Não Considera	Não Considera	Não Considera
Uso de Concreto Auto Adensável	Variável	Não Considera	Não Considera	Não Considera	Não Considera
Efeitos Dependentes do Tempo	Aumenta C.T.	Não Considera	Não Considera	Não Considera	Não Considera

Outro método de controle com bastante fundamentação em estudos (TUR e FIC, 2013) é através da medição do escorregamento das cordoalhas no momento da liberação da protensão. Quando a força de protensão é aliviada, as cordoalhas retraem ao longo do trecho de transferência de esforços, por encurtamento, até que atinjam a tensão máxima. Isso provoca um escorregamento da cordoalha em relação ao concreto que pode ser facilmente medido na extremidade da peça e utilizado, de forma confiável, como indicador da qualidade da transferência de esforços (OH e KIM, 2000; DANG et al., 2017).

4 Patologias e Reforços de Extremidade

A ocorrência de fissuras ou falhas mais graves é extremamente comum na fabricação de elementos protendidos pré-tracionados. Em pesquisa realizada nos EUA (HASENKAMP et al., 2008), cerca de 80% dos fabricantes de estruturas pré-moldadas para pontes consultados relataram a ocorrência de fissuras em suas vigas protendidas e, para a metade desses fabricantes, as fissuras ocorrem em mais de 80% das peças.

Existem diferentes causas para a fissuração em elementos pré-tracionados, as quais podem ser potencializadas pela aplicação da força de protensão em idades iniciais do concreto, pela liberação abrupta da força de protensão, pelo uso de forças excessivas ou pelo emprego de práticas construtivas

e considerações de projeto inadequadas. Os mecanismos de falha devido à transferência de esforços podem ser, simplificada, divididos em 3: por fendilhamento (splitting), por esboroamento (spalling) ou por cisalhamento (bursting). Embora, seja comum a ocorrência simultânea e sobreposição dos mecanismos.

Falhas por fendilhamento ocorrem quando as cordoalhas são posicionadas muito próximas ou com cobrimentos muito pequenos. A compressão gerada pela transferência de esforços, especialmente associada à dilatação radial das cordoalhas (efeito Hoyer), gera forças de tração circunferenciais ao redor das cordoalhas que podem levar a fissurações conforme a figura 2. As fissuras por fendilhamento, se forem localizadas e for verificado escorregamento limitado das armaduras, ou seja, sem perda de ancoragem, podem ser relevadas nos casos onde a extremidade da peça será solidarizada com a estrutura moldada no local (TUAN et al., 2004).

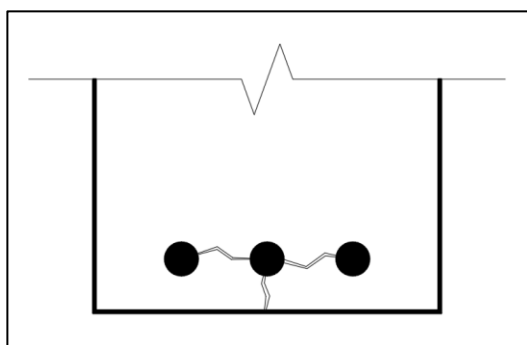


Figura 2 – Fissuras por fendilhamento. (Fonte: autor)

A introdução de forças de protensão excêntricas em relação ao eixo horizontal de vigas gera forças de tração rente à face da extremidade das mesmas (figura 3), onde os vetores de tensão são praticamente verticais (VAN MEIRVENNE et al., 2017). O emprego de forças elevadas, com concentração de cordoalhas ou uso de cordoalhas de maiores diâmetros e maiores tensões, pode levar a falhas por esboroamento (spalling) nesta região. A ocorrência de fissuras nas extremidades dos tipos splitting e spalling é especialmente preocupante em elementos onde não são utilizadas armaduras transversais como lajes alveolares (DERKOWSKI e DYBA, 2017), já que a força de protensão, quando introduzida adequadamente, possui efeito benéfico para a resistência ao cisalhamento. Nesses elementos, esse problema poderia ser satisfatoriamente contornado com o uso de fibras (HEGGER e BERTRAM, 2008).

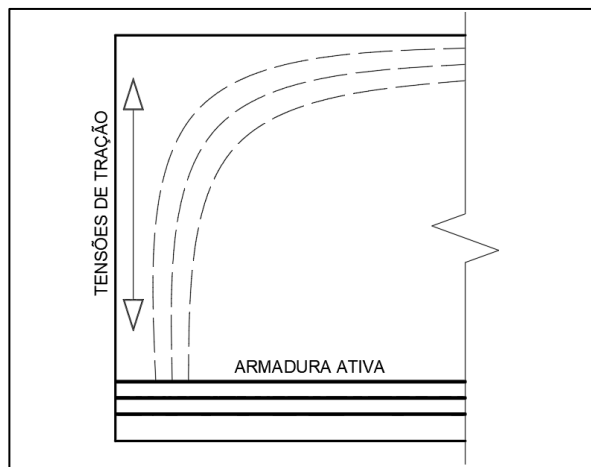


Figura 3 – Tensões de tração na face da extremidade (spalling). (Fonte: autor)

O excesso de força de protensão ou baixa resistência do concreto no momento da sua aplicação também pode levar à fissuração ou mesmo à ruptura do concreto na região da transferência de esforços. Fissuras por cisalhamento normalmente surgem na interface entre o talão inferior e a alma de vigas I e lajes alveolares (figura 4), assim como é comum o surgimento de fissuras longitudinais na alma das vigas. Segundo Hasenkamp (2008), é consenso que a maior parte dessas fissuras tende a diminuir quando a viga é colocada em carga e é recomendável a injeção de epóxi e selagem das mesmas, devendo-se reavaliar o elemento estrutural, considerando novos comprimentos de transferência, caso haja escorregamento das armaduras ativas.



Figura 4 – Fissuras na ligação da alma com o talão inferior em laje alveolar. (DERKOWSKI e DYBA, 2017)

Tendo em vista as tensões que surgem devido à introdução das forças de protensão, reforços devem ser adequadamente dimensionados e posicionados nas extremidades dos elementos. Para vigas, em especial para vigas de obras-de-arte, o dimensionamento usualmente considerado como padrão é dado no manual da AASHTO (AASHTO LRFD, 2012). Nele, é estipulado o reforço vertical mínimo, conforme a equação 9:

$$A_s = \frac{0,04 F_p}{\sigma_{sw}} \quad (9)$$

Onde, F_p é a força de protensão e σ_{sw} é a tensão média nas armaduras verticais, limitada a 138 MPa para o controle de fissuras. Ainda, apenas devem ser consideradas as armaduras verticais localizadas a uma distância $h/4$ da extremidade da viga.

Tuan et al. (2004) estudaram detalhadamente o efeito da força de protensão das armaduras verticais de reforço a fim de refinar o detalhamento das mesmas, uma vez que o dimensionamento proposto pela AASHTO (AASHTO LRFD, 2012) pode se tornar inviável por questões executivas em vigas que utilizam um grande número de cordoalhas e concretos de alta resistência. Verificou-se que a tensão nas barras de reforço reduz rapidamente com o aumento da distância em relação à extremidade da viga, sendo máxima na primeira barra e próxima de zero a partir da distância h da extremidade. A

força de fendilhamento máxima observada, por sua vez, foi de 3% da força de protensão, resistida em conjunto pelas armaduras de reforço e pelo concreto.

A partir dessas observações, Tuan et al. (2004) recomendam que as armaduras de reforço devem estar tão próximas quanto possível da extremidade, sendo que na distância $h/8$ deve haver armadura suficiente para resistir a 2% da força de protensão, limitando-se a tensão a 138MPa, utilizando-se, possivelmente, armaduras de diâmetros maiores devidamente ancoradas nas faces superior e inferior da viga (recomenda-se a solda das barras em placas na base para diâmetros elevados, a critério do projetista). Adicionalmente, deve-se acrescentar aos estribos armadura suficiente para resistir a 1% da força de protensão, com tensão limitada, na distância entre $h/8$ e $h/2$ da extremidade. Em vigas I, também se deve reforçar as armaduras de ligação entre a mesa inferior e a alma da viga com armaduras diagonais, preferencialmente inclinadas (VAN MEIRVENNE et al., 2017).

Na figura 5 é apresentada um comparação entre as propostas de dimensionamento pela AASHTO LRFD (2012) e por Tuan et al. (2004) e Van Meirvenne et al. (2017), considerando-se uma força de protensão $F_p = 210tf$. Além das armaduras apresentadas, as quais visam evitar as fissurações por fendilhamento e esboroamento na extremidade, é preciso garantir o adequado confinamento das armaduras de protensão no talão inferior a fim de prevenir o escorregamento das armaduras. A AASHTO LRFD (2012) estipula para tal fim um reforço mínimo de barras de 10mm espaçadas a cada 15cm por uma distância de 1,5 vezes a altura útil. Este reforço não afeta o comprimento de transferência, uma vez que as armaduras permanecem inativas até o surgimento das primeiras fissuras, no entanto, as armaduras de confinamento reduzem o comprimento de ancoragem necessário para as armaduras ativas (PATZLAFF, 2012).

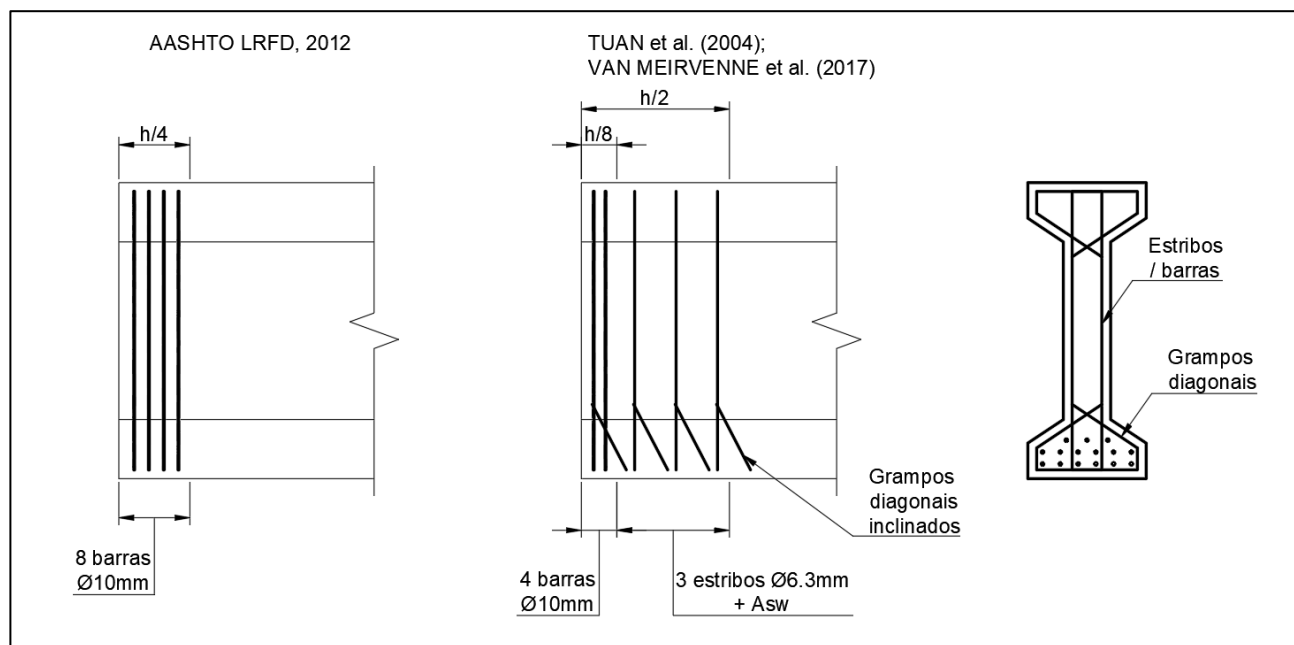


Figura 5 – Armaduras de reforço de extremidade para $F_p = 210tf$. (Fonte: autor)

5 Conclusão

As tensões de ligação de armaduras ativas em concreto protendido pré-tracionado, conforme detalhado ao longo do texto, são influenciadas pelos mais diversos fatores desde as características das armaduras, às propriedades do concreto e aos métodos executivos. Esses fatores são apenas

parcialmente considerados nas normas aqui estudadas, sendo que a NBR 6118 (ABNT, 2014), o Eurocódigo 2 (IPQ, 2010) e o Model Code 2010 (CEB, 2012) apresentam um refinamento de cálculo superior ao ACI 318 (ACI, 2014). Devido à alta complexidade desse fenômeno, seria inviável que as normas considerassem todos os fatores, no entanto, seria plausível e recomendável que fizessem ponderações, além dos pontos já considerados, a respeito do uso de espaçamentos e cobrimentos reduzidos (os quais podem ser prejudiciais), bem como sobre o uso de concretos com fibras, leves ou auto adensáveis.

O incentivo a adoção de testes padrão, principalmente em fábricas, também é altamente recomendado devido à facilidade de aplicação e as ótimas garantias que oferecem no que tange a verificação da qualidade da ligação executada. Esses testes se tornam extremamente necessários tendo em vista a constante evolução dos materiais, o elevado grau de incerteza dos equacionamentos e a frequente ocorrência de patologias devido à introdução de esforços.

Por fim, o adequado dimensionamento das armaduras passivas de reforço é essencial para reduzir a alta prevalência de fissuras e falhas de ancoragem observadas em elementos pré-tracionados. Tanto o método proposto pela AASHTO LRFD (2012) quanto por Tuan et al. (2004) com considerações de van Meirvenne et al. (2017) são válidos e, em que pese algumas diferenças, validam um ao outro, cabendo, assim, ao projetista a escolha do ideal para cada caso.

6 Referências

- AASHTO LRFD – American Association of State Highway and Transportation Officials, “Bridge Design Specifications”, Washington, D.C., USA, 2012.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Projeto de estruturas de concreto: Procedimentos – NBR 6118/2014”, Rio de Janeiro.
- ACI – American Concrete Institute, “Building code requirements for reinforced concrete – ACI 318”, Michigan, EUA, 2014.
- CEB – Comité Euro-International du Béton, “CEB-FIP: Model Code 2010 – Vol 1”, Lausanne, Suíça, 2012.
- IPQ – Instituto Português de Qualidade, “Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, Caparica, Portugal, 2010.
- BRIERE V.; HARRIES, K. A.; KASAN, J.; HAGER, C. “Dilation Behaviour on Seven-Wire Prestressing Strand – The Hoyer Effect”, Construction and Building Materials v.40, 2013.
- CARO, L. A.; MARTÍ-VARGAS, J. R.; SERNA, P. “Time-Dependent Evolution of Estrand Transfer Length in Pretensioned Prestressed Concrete Members”, Universidade Politécnica de Valência, Espanha, 2013.
- COUTO FILHO, J. e DELLA BELLA, J. C. “Estudo da Transferência da Força de Protensão para o Concreto em Peças Pré-Tracionadas”, Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, São Carlos, 2005.
- DANG, C. N.; MURRAY, C. D.; FLOYD, R. W.; HALE, W. M.; MARTÍ-VARGAS, J. R. Correlation of Strand Surface Quality to Transfer Length. ACI Structural Journal, Setembro-Outubro, 2014.
- DANG, C. N.; FLOYD, R. W.; MURRAY, C. D.; HALE, W. M.; MARTÍ-VARGAS, J. R. “Bond Stress-Slip Model for 0.6 in. (15.2 mm) Diameter Strand”, ACI Structural Journal, Setembro-Outubro, 2015.
- DANG, C. N.; FLOYD, R. W.; HALE, W. M.; MARTÍ-VARGAS, J. R. “Spacing Requirements of 0.7 in. (18 mm) Diameter Prestressing Strands”, PCI Journal, Janeiro-Fevereiro, 2016.
- DANG, C. N.; FLOYD, R. W.; HALE, W. M.; MARTÍ-VARGAS, J. R. “Prediction of Development Length from Free-End Slip in Pretensioned Concrete Members”, ICE, Magazine of Concrete Research, 2017.

DERKOWSKI, W. e DYBA, M. “Behaviour of End Zone of Pre-Tensioned Concrete Elements”, Cracóvia, Polônia, 2017.

DUMÊT, T. B. e PINHEIRO L. M. “Aderência de Cordoalhas Pré-Tracionadas em Concretos com e sem Fibras de Aço”, Caderno de Engenharia de Estruturas, v. 9, n. 39, São Carlos, 2007.

HASENKAMP, C. J.; BADIE, S. S.; TUAN, C. Y.; TADROS, M. K. “Sources of End Zone Cracking of Pretensioned Concrete Girders”, Universidade de Nebraska, Omaha, EUA, 2008.

HEGGER, J. e BERTRAM, G. “Shear carrying capacity of Ultra-High Performance Concrete beams”, Institute of Structural Concrete at RWTH Aachen University, Aachen, Alemanha, 2008.

JALAL, A.; SHAFIQ, N.; ZAHID, M. “Investigating the Effects of Fiber Reinforced Concrete on the Performance of End-Zone of Pre-Stressed Beams”, Universidade Tecnológica Petronas, Materials Journal, Malasia, 2019.

KAREEM, R. S.; AL-MOHAMMEDI, A.; DANG, C. N.; MARTÍ-VARGAS, J. R.; HALE W. M. “Bond Model of 15.2 mm Strand with Consideration of Concrete Creep and Shrinkage”, ICE, Magazine of Concrete Research, 2019.

KIM, J. K.; YANG, J. M.; YIM, H. J. “Experimental Evaluation of transfer Length in Pretensioned Concrete Beams Using 2,400 Mpa Prestressed Strands”, ASCE, Journal of Structural Engineering, 2016.

LEONHARDT, F. e MÖNNIG E. “Construções de Concreto – Concreto protendido – Vol 1”, Rio de Janeiro: Interciência, 2008a.

LEONHARDT, F. e MÖNNIG E. “Construções de Concreto – Concreto protendido – Vol 2”, Rio de Janeiro: Interciência, 2008b.

LEONHARDT, F. e MÖNNIG E. “Construções de Concreto – Concreto protendido – Vol 5”, Rio de Janeiro: Interciência, 2008c.

MOHANDOSS, P.; PILLAI, R. G.; SENGUPTA A. K. “Transmission Length of Pretensioned Concrete Systems – Comparison of Codes and Test Data”, ICE, Magazine of Concrete Research, 2019.

OH, B. H.; LIM, S. N.; LEE, M. K.; YOO, S. W. “Analysis and Prediction of Transfer Length in Pretensioned, Prestressed Concrete Members”, ACI Structural Journal, Maio, 2014.

OH, B. H e KIM, E. S. “Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned, Prestressed Concrete Members”, ACI Structural Journal, November-December, 2000.

PATZLAFF, Q.; MORCOUS, G.; HANNA, K.; TADROS, M. K. “Bottom Flange Confinement Reinforcement in Precast Prestressed Concrete Bridge Girders”, ASCE, Journal of Bridge Engineering, Julho-Agosto, 2012.

PETERMAN, R. J. “The Effects of As-Cast Depth and Concrete Fluidity on Strand Bond” PCI Journal, Maio-Junho, 2007.

TUAN, C. Y.; YEHIA, S. A.; JONGPITAKSSEEL, N.; TADROS, M. K. “End Zone Reinforcement for Pretensioned Concrete Girders”, PCI Journal, Vol. 49, 2004.

TUR, V.; FIC, S. “Control of the Transmission Length in the Prestressed Hollow-Core Slabs Using Values of the Strand End Slip”, Faculdade de Construção e Arquitetura, Lublin, Polônia, 2013.

VAN MEIRVENNE, K.; DE CORTE, W.; BOEL, V.; TAERWE, L. “New Insights into the Anchorage Zones of Precast Pretensioned Concrete Girders”, Key Engineering Materials, Vol. 754, 2017.

VÁSQUEZ-HERRERO, C.; MARTÍNES-LAGE, I.; AGUILAR, G.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. “Evaluation of Strand Bond Properties Along the Transfer Length of Prestressed Lightweight Concrete Members”, Elsevier, Engineering Structures, 2013.