

Critérios de Aceitação de Dispositivos de Ancoragem para Concreto com Armadura Ativa Pós-Tracionada Sem Aderência

Fábio Albino de Souza¹

¹ Instituto Nacional de Estruturas Protendidas – INAEP – eng.fabio.35@gmail.com

Resumo

O concreto protendido em especial a modalidade com armadura ativa pós-tracionada sem aderência tornou-se uma tecnologia muito versátil com distintas aplicações como em lajes lisas, lajes cogumelos, lajes nervuradas, vigas, raders entre outros elementos estruturais, usado praticamente em todo o mundo devido a sua simplicidade de execução. Uma vez não criada aderência com o concreto, a armadura ativa se conecta em pontos localizados denominados conjuntos de ancoragem na qual equivale a um dispositivo mecânico que contém todos os componentes necessários para transferir a força de protensão para a estrutura. Devido a sua importância e para o bom funcionamento do sistema pós-tracionado sem aderência, diversas normativas como a ACI 318-19, ACI 423.7-14, PTI M10.2-17 e a AC303-2007 estabeleceram critérios de aceitação levando em conta ensaios estáticos e dinâmicos das placas de ancoragem e cunha, visto que as mesmas constituem os principais componentes do conjunto de ancoragem. Sabe-se que até o presente momento o Brasil não dispõe de uma normativa para ensaios dos dispositivos de ancoragem, fato que nos gera relativo desconforto dado a magnitude das obras já executadas no país. Contudo este artigo mostra um estudo de caso de um dispositivo de ancoragem desde o projeto, extrapolando para a realização dos ensaios estáticos e dinâmicos de acordo com os critérios das normativas citadas anteriormente e os procedimentos de aceitação, vislumbrando contribuir com informações relevantes para a segurança do sistema e de seus usuários.

Palavras-chave

Placas de Ancoragem; Concreto Protendido; Lajes Protendidas; Cordoalha Engraxada e Plastificada

Introdução

O concreto protendido em especial a modalidade com armadura ativa pós-tracionada sem aderência tornou-se uma tecnologia muito versátil com ampla utilização em lajes de edifícios residenciais, comerciais, hotéis, entre outros tipos de estruturas, usado praticamente em todo o mundo devido a sua simplicidade de execução. A predileção pelo sistema em pós-tração não aderente nos EUA fica compreensível uma vez que inúmeros testes foram realizados ao longo dos últimos 60 (sessenta) anos na qual pode-se citar os trabalhos pioneiros relacionados à flexão de SCORDELIS et al. (1956), GAMBLE (1964), HEMAKOM (1970). No Brasil o uso das cordoalhas engraxadas e plastificadas teve seu início na década de 1990 pois anteriormente a modalidade usual era a pós-tração aderente com a utilização de cordoalhas nuas e bainhas metálicas com injeção de calda de cimento como descrito por CAUDURO (2002). Sabe-se que o desenvolvimento, aplicação e evolução de um sistema estrutural passa por diferentes fases até que realmente possa ser usado, sendo assim durante esse processo um dos principais tópicos refere-se a especificação e desempenho dos materiais utilizados. Uma vez não criada aderência com o concreto, a armadura ativa se conecta em pontos localizados denominados conjuntos de ancoragem na qual equivale a um dispositivo mecânico que contém todos os componentes necessários para transferir a força de protensão para a estrutura. Devido a sua importância e para o bom funcionamento do sistema pós-tracionado sem aderência, diversas normativas internacionais como a ACI 318-19 (2019), ACI 423.7-14 (2014), PTI M10.2-17 (2017) e a AC303 (2007) estabeleceram critérios de aceitação levando em conta ensaios estáticos e dinâmicos

das placas de ancoragem e cunha, visto que as mesmas constituem os principais componentes do conjunto de ancoragem. Assim como nos EUA, obviamente com uma proporção menor até mesmo por ser uma técnica relativamente recente no país, o Brasil vem se destacando na utilização do sistema pós-tração não aderente com cordoalhas engraxadas e plastificadas, portanto julga-se importante demonstrar os principais critérios relacionados a dispositivos de ancoragem empregados para o seu melhor desempenho. Sabe-se que até o presente momento o Brasil não dispõe de uma normativa para ensaios dos dispositivos de ancoragem, fato que nos gera relativo desconforto dado a magnitude das obras já executadas no país. O artigo procura traçar um limiar vislumbrando contribuir com informações relevantes para a segurança do sistema e de seus usuários, além de mostrar um estudo de caso de um dispositivo de ancoragem desde o projeto, extrapolando para a realização dos ensaios estáticos e dinâmicos de acordo com os critérios das normativas citadas anteriormente e os procedimentos de aceitação.

Metodologia

De uma maneira geral as normativas seguem uma filosofia padrão constituídas por comitês formados por representantes dos setores envolvidos em que todos votam para aprovação dos temas discutidos ou ainda estabelecem uma hierarquia no próprio comitê para membros votantes, não votantes e convidados, sendo as premissas baseadas nos códigos de conduta das instituições. As normativas estabelecem e definem as temáticas a serem tratadas, no entanto podem ser complementadas por outras normas que estabeleçam tópicos mais aprofundados sobre determinado assunto. A composição do texto em sua maioria acontece em capítulos integrando tabelas, gráficos, equações, entre outros recursos que fazem com que o texto fique coeso. Não obstante algumas normativas possuem comentários dos tópicos tratados bem como referências bibliográficas, fato que agrega maior transparência ao leitor além de que uma normativa precisa ter a maior clareza possível e não ser subjetiva. Diante disso fez-se a coletânea das principais normativas referentes a dispositivos de ancoragem para concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência, apresentando critérios de aceitação das mesmas, seja relativo a recomendações em projeto, requisitos mínimos dos materiais, fabricação ou ensaios mecânicos.

Critérios ACI 318-19 (2019)

A ACI 318-19 (2019) menciona no seu escopo que fornece os requisitos mínimos para materiais, projeto, construção e avaliação dos elementos e sistemas estruturais de concreto em qualquer estrutura projetada e construída. O primeiro tópico referente aos critérios estabelecidos pela ACI 318-19 (2019) encontra-se no item 25.8.1 na qual a referida normativa menciona que os dispositivos de ancoragem para pós-tração não aderente devem desenvolver pelo menos 95% da carga de ruptura especificada da cordoalha. Vale lembrar que o item 20.3.1 remete que a cordoalha precisa cumprir obrigatoriamente os padrões mínimos aplicáveis da ASTM A 416/A416M-18 (2018), portanto pode-se encontrar a carga mínima de ruptura para diversas classes e diâmetros de cordoalhas e assim realizar o cálculo requerido. Um ponto a ser comentado sobre esse item relaciona-se ao fato de que a força de projeto adotada na cordoalha será menor que a carga mínima de ruptura, portanto a ACI 318-19 (2019) entende que o item foi atendido. Sobre os testes a referida normativa menciona que o dispositivo de ancoragem pode apresentar uma deformação permanente, o que de fato pode ocorrer, porém em pequena magnitude. O segundo tópico encontra-se no item 25.8.3 na qual especifica que em construções em concreto protendido com pós-tração não aderente sujeitas a cargas repetitivas, a possibilidade de fadiga na armadura de protensão nas ancoragens devem ser consideradas.

Critérios ACI 423.7 (2014)

A ACI 423.7 (2014) fornece especificações e critérios de fabricação para materiais utilizados em concreto protendido pós tração não aderente, em que para dispositivos de ancoragem a normativa menciona que deve ser realizado teste estático e fadiga. Para o teste estático os dispositivos de ancoragem para pós-tração não aderente devem desenvolver pelo menos 95% da carga de ruptura

especificada da cordoalha e apresentar um alongamento total na carga de ruptura não inferior a 2,0% (dois por cento), esse último um critério de ductilidade. Com relação ao teste de fadiga em um primeiro teste o dispositivo de ancoragem deve ser submetido a 500000 ciclos entre 60% e 66% da carga de ruptura especificada da cordoalha, e em um segundo teste deve ser submetido a 50 ciclos entre 40% e 85% da carga de ruptura especificada da cordoalha. Vale lembrar que um ciclo completo envolve a mudança de um nível de carga menor para o nível de carga maior e a volta para o nível de carga menor. Um aspecto de relevância descrito pela normativa aponta para que componentes de diferentes fabricantes não devem ser usados em um dispositivo de ancoragem, a menos que forem submetidos ao teste estático e de fadiga.

Critérios PTI M10.2-17 (2017)

A PTI M10.2-17 (2017) dispõe critérios mínimos de desempenho para materiais, requisitos para fabricação e instalação de dispositivos de ancoragem para concreto protendido pós tração não aderente, consiste em uma das normativas mais completas em termos de especificações. Recomenda o fornecimento de relatórios de teste estático e de fadiga por cada lote fabricado e quando houver uma modificação no dispositivo de ancoragem, ademais cita que as cunhas e as placas de ancoragem devem ser identificadas para facilitar sua rastreabilidade. A responsabilidade de preparação das amostras e escolha do laboratório fica designado ao fabricante do sistema na qual recomenda o uso de amostras separadas para o teste estático e de fadiga realizados em uma série de três testes consecutivos com cordoalhas do mesmo lote em um laboratório credenciado pela ASTM C 1077 (2017). A normativa menciona ainda que o projeto das cunhas utilizadas nas placas de ancoragem deve impedir a falha da cordoalha por pinçamento na região das ancoragens durante a realização dos testes estáticos e de fadiga. Com relação ao teste estático a normativa menciona que alguns itens devem ser extraídos como: determinação da tensão de escoamento da cordoalha, carga de ruptura especificada da cordoalha e o alongamento percentual da cordoalha. Sobre os dispositivos de ancoragem para pós-tração não aderente os mesmos devem desenvolver pelo menos 95% da carga de ruptura especificada da cordoalha e apresentar um alongamento total na carga de ruptura não inferior a 2,0% (dois por cento). No tocante ao teste de fadiga devem ser realizados dois ensaios, sendo que no primeiro ensaio o dispositivo de ancoragem deve suportar 500000 ciclos entre 60% e 66% da carga de ruptura especificada da cordoalha e no segundo ensaio o dispositivo de ancoragem deve suportar 50 ciclos entre 40% e 85% da carga de ruptura especificada da cordoalha. Por fim a normativa destaca que não se deve utilizar componentes de diferentes fabricantes sem a realização dos testes necessários (estático e de fadiga).

Critérios AASHTO LRFDCONS-4 (2020)

A AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) constitui-se de uma associação que desenvolve e rege a produção de normativas técnicas para planejamento, projeto, materiais, construção de rodovias e pontes por meio de seus comitês na qual a normativa AASHTO LRFDCONS-4 (2020) fornece especificações para os dispositivos de ancoragem para pós-tração com ênfase para pontes. A normativa menciona que todos os dispositivos de ancoragem devem desenvolver pelo menos 95% da carga de ruptura real da cordoalha e que os testes estáticos devem seguir as recomendações da normativa PTI M50.1 (1998), aplicáveis para sistemas aderentes e não aderentes. Também devem ser realizados dois testes dinâmicos (fadiga) em uma amostra representativa da ancoragem e a cordoalha deve suportar, sem falhar, 500000 ciclos de 60% a 66% de sua carga mínima de ruptura especificada e 50 ciclos de 40% a 80% da sua carga mínima de ruptura especificada. Cada ciclo de ser considerado como a mudança de um nível de carga menor para o nível de carga maior e a volta para o nível de carga menor. Para o teste dinâmico (fadiga) permite-se o uso de diferentes amostras para cada um dos testes e ainda admite-se no caso de uma placa de ancoragem com múltiplas cordoalhas a utilização de somente uma cordoalha. As ancoragens para pós-tração não aderente, não devem causar uma redução no alongamento total sob carga última de ruptura da cordoalha menor que 2,0% (dois por cento).

Critérios AC303 (2020)

A ICC Evaluation Service (ICC-ES) consiste em uma subsidiária do International Code Council (ICC) que desenvolve os códigos internacionais (I-Codes) e juntas incorporam técnicas e práticas nas normativas além de realizar avaliações técnicas de produtos de construção. A AC303 (2020) possui critérios de aceitação para ancoragens em pós-tração não aderente através do ICC-ES com relatório de acordo com o International Building Code (IBC). Por ser uma normativa propriamente de ensaio apresenta regulamentos severos partindo desde a descrição do material das ancoragens até as dimensões finais com tolerâncias, e também preconiza a realização de ensaios estáticos e de fadiga. Para os testes estáticos uma quantidade mínima de três amostras deve ser preparada incluindo a formação de todo o dispositivo, ou seja, a placa de ancoragem, da cunha e a cordoalha sem a presença do concreto. A respeito das condições de aceitação do teste estático o dispositivo deve demonstrar falha na cordoalha pelo menos a 95% da carga de ruptura real da cordoalha e o alongamento da cordoalha de cada conjunto na carga de ruptura deve ser de pelo menos 2,0% (dois por cento). No que concerne ao teste de fadiga duas séries contemplam o ensaio, sendo a primeira com a aplicação de 50 ciclos de 40% a 85% da carga mínima de ruptura especificada da cordoalha em uma frequência de 1 a 3 Hertz, e o segundo com aplicação de 500000 ciclos de 60% a 66% da carga mínima de ruptura especificada da cordoalha em uma frequência de 1 a 10 Hertz. Vale lembrar que para os testes de fadiga no mínimo dois dispositivos de cada série devem ser utilizados, não necessariamente os mesmos devem ser utilizados nas duas séries, o concreto não deve fazer parte do ensaio e o critério de aceitação consiste em que os dispositivos devem suportar as cargas dinâmicas sem falha.

Discussão sobre os critérios de aceitação

Pode-se dizer que as normativas estudadas nesse artigo apresentam características distintas com relação a sua finalidade, sendo a ACI 318-19 (2019) e a AASHTO LRFDCONS-4 (2020) com foco nas recomendações para projetos e construção de edifícios e pontes. No tocante a ACI 423.7 (2014) e a PTI M10.2-17 (2017) o enfoque encontra-se nas especificações dos dispositivos de ancoragem e pôr fim a AC303 (2020) que explora tanto as especificações quanto o ensaio dos dispositivos. Observou-se que embora alguns tópicos apresentados pelas normativas possam parecer congruentes a perspectiva ao analisar o conjunto remete ao fato de que uma normativa complementa a outra, porém todas construíram critérios de aceitação de dispositivos de ancoragem para concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência. Do ponto de vista dos ensaios, todas as normativas recomendaram a realização de ensaios estáticos e de fadiga (dinâmicos) como critério elementar para aceitação, sendo assim cabe ressaltar alguns pontos na nomenclatura que podem causar divergências no entendimento. Para o teste estático as normativas ACI 318-19 (2019), ACI 423.7 (2014) e PTI M10.2-17 (2017) mencionam que os dispositivos de ancoragem para pós-tração não aderente devem desenvolver pelo menos 95% da carga de ruptura especificada da cordoalha, porém as normativas AASHTO LRFDCONS-4 (2020) e AC 303 (2020) mencionam que o dispositivo deve demonstrar falha na cordoalha pelo menos a 95% da carga de ruptura real da cordoalha. Existe uma divergência em utilizar a carga de ruptura especificada da cordoalha e a carga de ruptura real da cordoalha, e a elucidação pode ser encontrada na ASTM A 416/A416M-18 (2018), na qual uma cordoalha pode ser classificada em diversas categorias de acordo com a sua resistência à tração. Assim a referida normativa possui uma tabela padrão com valores mínimos da carga de ruptura para diversas categorias e diâmetros de cordoalhas o que se entende como a carga de ruptura especificada da cordoalha. Não obstante para que uma cordoalha possa ser aprovada nos critérios de resistência à tração a mesma deve desenvolver uma carga de ruptura maior que a especificada, na qual entende-se como a carga de ruptura real da cordoalha. Sendo assim as normativas AASHTO LRFDCONS-4 (2020) e AC 303 (2020) apresentam critérios mais rigorosos de aceitação dos dispositivos de ancoragem pois levam em conta a carga de ruptura real da cordoalha, ou seja, valores maiores que a carga de ruptura especificada da cordoalha. Pode-se concluir em outras palavras que a eficiência do dispositivo de ancoragem deve ser de no mínimo 95% da carga de ruptura real da cordoalha, ou seja, um importante requisito que o dispositivo deve atender tendo como objetivo uma redução máxima de 5% da capacidade de ruptura da cordoalha. Assim essa eficiência só pode ser mensurada tendo como

referência a carga de ruptura real da cordoalha através do teste estático. Ainda no teste estático a normativa PTI M10.2-17 (2017) menciona que devem ser extraídas a tensão de escoamento da cordoalha, carga de ruptura da cordoalha e o alongamento percentual da cordoalha. Entende-se que os dispositivos de ancoragem não devem alterar tais propriedades encontradas na ASTM A 416/A416M-18 (2018) embora haja uma ressalva com relação ao alongamento, em que as normativas ACI 423.7 (2014), PTI M10.2-17 (2017), AASHTO LRFDCONS-4 (2020) e AC 303 (2020) permitem um alongamento da cordoalha na carga de ruptura de pelo menos 2,0% (dois por cento), diverso da ASTM A 416/A416M-18 (2018) que recomenda no mínimo 3,50% (três e meio por cento) para o ensaio da cordoalha sem os dispositivos de ancoragem. Segundo ACI PRC-215-21 (2022) a fadiga consiste em um processo mecânico de degradação causada por cargas repetitivas, como de tráfego ou cargas normais de vento em pontes, resultando em danos irreversíveis no concreto das estruturas, que ocorrem gradualmente a partir dos efeitos acumulativos de milhares ou milhões de ciclos de carga. Portanto quando ocorre o fenômeno da fadiga no concreto com armadura ativa pós-tração sem aderência gera-se mudanças de tensão no aço de protensão e passam diretamente a serem transmitidas aos dispositivos de ancoragem. Embora os dispositivos de ancoragem sejam submetidos ao teste estático em um primeiro momento torna-se improvável afirmar que sejam capazes de desenvolver a mesma capacidade no teste de fadiga, pois podem causar um aumento de tensão localizado e, por conseguinte devem ser confirmados através dos testes experimentais. A fadiga afeta a estrutura em serviço, a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto sendo assim seus efeitos devem ser reconhecidos no projeto para garantir que mudanças de tensão cíclicas em serviço permaneçam em níveis aceitáveis ou baixos. Para o teste de fadiga as normativas ACI 423.7 (2014), PTI M10.2-17 (2017) e AC 303 (2020) mencionam que os dispositivos de ancoragem para pós-tração não aderente devem ser submetidos a 500000 ciclos de 60% a 66% de sua carga mínima de ruptura especificada e 50 ciclos de 40% a 85% da sua carga mínima de ruptura especificada, sem apresentar falha na cordoalha ou no dispositivo de ancoragem. Porém a normativa AASHTO LRFDCONS-4 (2020) apresenta no segundo ciclo uma divergência apresentando 50 ciclos de 40% a 80% da sua carga mínima de ruptura especificada, ou seja, pequena diminuição do ciclo de carregamento assim entende-se que as outras normativas citadas acima para o teste de fadiga apontam para critérios mais rígidos na avaliação deste procedimento. Diante de todo exposto verificou-se que a normativa AC 303 (2020) apresentou os critérios mais rígidos tanto para os ensaios estáticos e de fadiga dessa forma a mesma foi escolhida para conduzir os ensaios propostos no estudo de caso desse artigo.

Estudo de Caso

O estudo de caso desse artigo compreendeu a criação de um dispositivo de ancoragem para pós-tração não aderente capaz de ser aprovado no teste estático e de fadiga de acordo com a AC 303 (2020) para a designação CP 190 RB 12,7 conforme especificado pela NBR 7483 (2021). O primeiro passo para o desenvolvimento da placa de ancoragem foi estabelecer o projeto preliminar com o máximo de informações definidas como dimensões, materiais e tolerâncias de medidas para uma boa montagem e desmontagem quando em aplicação. Em seguida elaborou-se uma análise estrutural da placa de ancoragem através de uma modelagem numérica em elementos finitos levando em conta o item 9.6.1.2.1 da NBR 6118 (2014) referente aos valores limites por ocasião da operação de protensão, onde os resultados das tensões podem ser observados na figura 1a. Após revisões significativas no projeto preliminar da placa de ancoragem onde suas dimensões foram alteradas, feitos enrijecimentos nas aletas laterais e mais dois furos no elemento pode-se observar o resultado final na figura 1b. Com relação às dimensões da placa de ancoragem fixou-se a largura de 127mm e altura de 63mm respeitando as tolerâncias especificadas na NBR ISO 2768-2 (2001). A respeito dos requisitos de material optou-se pelo ferro fundido nodular de acordo com a NBR 6916 (2017), totalizando assim a massa final do elemento em 630g. O segundo passo partiu do prognóstico obtido nos resultados da placa de ancoragem de modo a conceber o projeto da cunha com um aço com alto teor de enxofre e adição de chumbo na composição química permitindo um aumento da velocidade de usinagem e ótimo acabamento superficial. Consecutivamente prosseguiu-se para uma nova análise estrutural levando em consideração o efeito da cunha na análise final das tensões do dispositivo de ancoragem

através da modelagem numérica em elementos finitos como pode ser observado na figura 2a. Verificou-se a necessidade de realização de um tratamento térmico nas cunhas para melhorar o seu comportamento à dureza quando em contato com a cordoalha. O comprimento oportuno da cunha após os testes realizados foi de 33mm possuindo uma massa final de 60g, como pode ser observado na figura 2b.

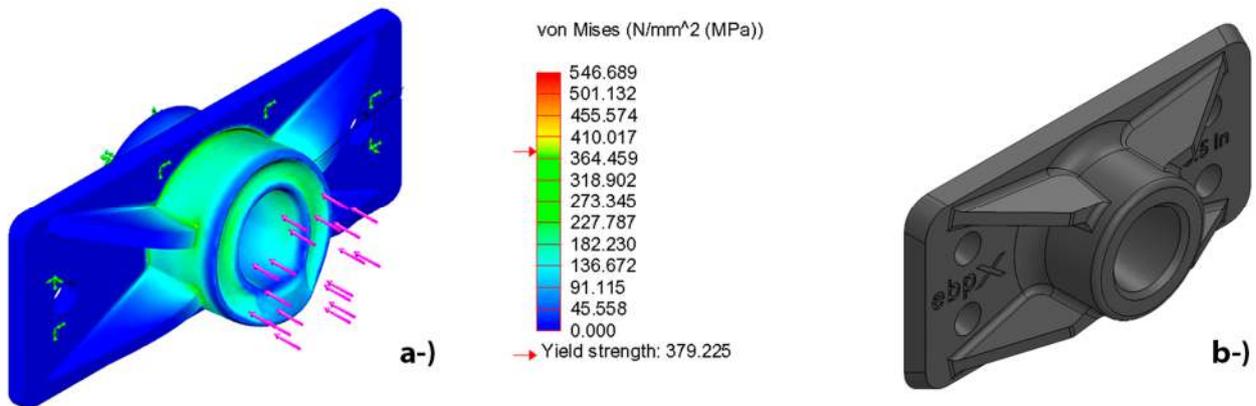


Figura 1 – a-) Análise preliminar das tensões na placa de ancoragem e b-) Modelo final da placa de ancoragem.

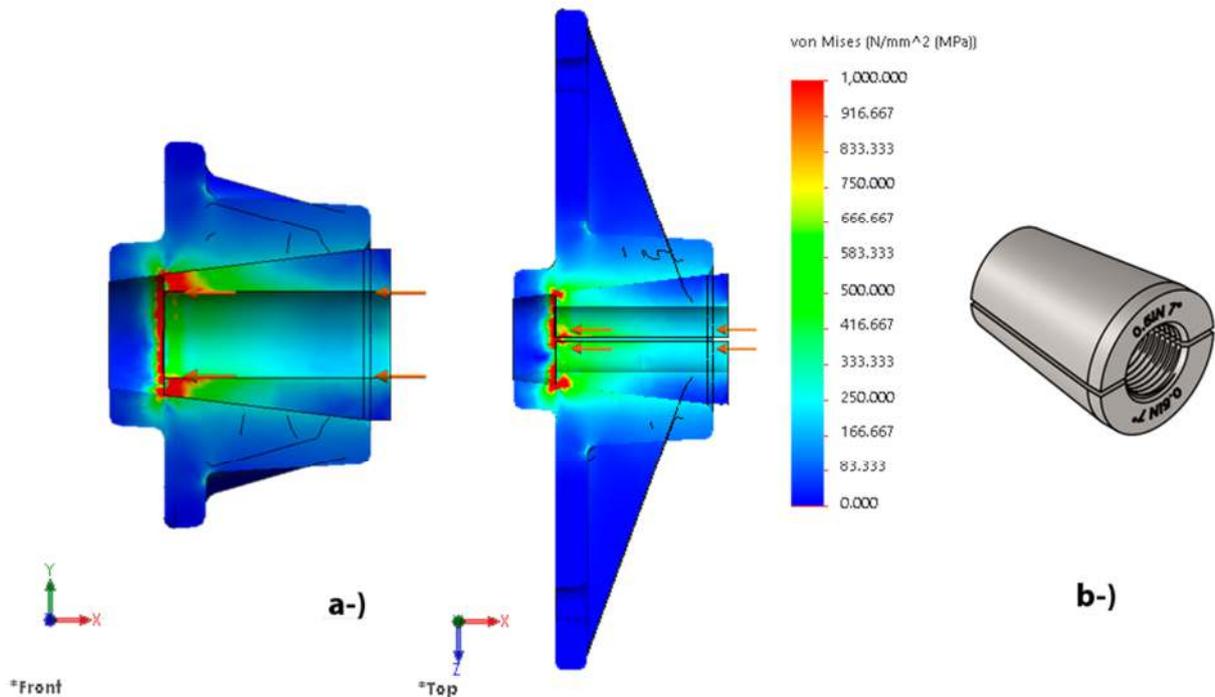


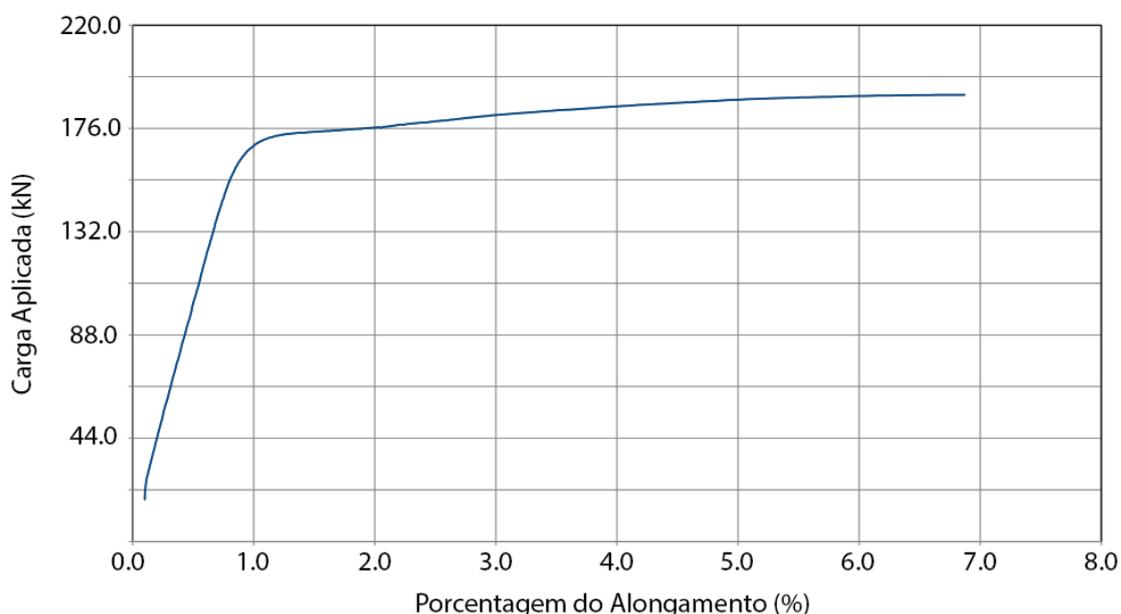
Figura 2 – a-) Análise das tensões na placa de ancoragem levando em consideração aplicação da cunha e b-) Modelo final da cunha.

Após a confecção da placa de ancoragem e da cunha iniciou-se os testes em laboratório com objetivo de classificar a cordoalha e retirar dados como área da seção transversal, carga a 1% do alongamento, carga de ruptura e alongamento para devida aprovação de acordo com a ASTM A 416/A416M-18 (2018). A tabela 1 mostra o resumo dos resultados obtidos no ensaio.

Tabela 1 – Resumo obtido das propriedades da cordoalha no teste de tração

Amostra	Massa (g)	Comprimento (mm)	Área da Seção Transversal (mm ²)	Carga a 1% do Alongamento (kN)	Carga de Ruptura (kN)	Alongamento na Carga Ruptura (%)
CP 190 RB – 12,7 mm	236,7	301,00	99,35	170,32	192,39	6,14

Os resultados mostraram total congruência e aprovação nas exigências da ASTM A 416/A416M-18 (2018) para utilização da cordoalha CP 190 RB – 12,7 mm e o gráfico da curva carga aplicada x porcentagem do alongamento (%) encontra-se na figura 3.

**Figura 3 – Curva carga aplicada x porcentagem de alongamento (%) para cordoalha CP 190 RB – 12,7 mm**

Deste modo prosseguiu-se para a realização do teste estático em um total de quatro amostras onde as placas de ancoragem e a cunha foram posicionadas nas extremidades da cordoalha. Os resultados obtidos podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultado do teste estático de acordo com a AC303 (2020)

Amostra	Conjunto Ancoragem	Alongamento Total (%)	Carga de Ruptura (kN)	95% da Carga Ruptura Real da Cordoalha (kN)	Aprovado/ Reprovado
EBPX – 01- 12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	4,25	186,47	182,77	Aprovado
EBPX – 02- 12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	4,25	186,47	182,77	Aprovado
EBPX – 03- 12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	4,97	184,70	182,77	Aprovado
EBPX – 04- 12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	4,97	184,70	182,77	Aprovado

De acordo com a AC303(2020) todas as amostras foram aprovadas e percebeu-se que o estado das mesmas após o ensaio estático foi excelente não demonstrando fissuras nem deformação na placa de ancoragem e cunhas, como pode ser observado na figura 4. A figura 5 mostra o gráfico da curva carga aplicada x porcentagem do alongamento (%) para o conjunto de ancoragem EBPX 12,7 mm e cunha 7° referente as amostras 03 e 04. Em seguida foram realizados os testes de fadiga em um total de dois dispositivos para cada série, ou seja, para cada ciclo de carregamento, sendo a aplicação de 50 ciclos de 40% a 85% da carga mínima de ruptura especificada da cordoalha em uma frequência de 1 Hertz, e aplicação de 500000 ciclos de 60% a 66% da carga mínima de ruptura especificada da cordoalha em uma frequência de 6 Hertz. Os resultados obtidos podem ser observados na tabela 3 e de acordo com a AC303(2020) todas as amostras foram aprovadas e percebeu-se que o estado das mesmas após o ensaio de fadiga também foi excelente não demonstrando fissuras nem deformação na placa de ancoragem e cunhas, como pode ser observado na figura 6.



Figura 4 – Placas de ancoragem e cunhas após o ensaio estático

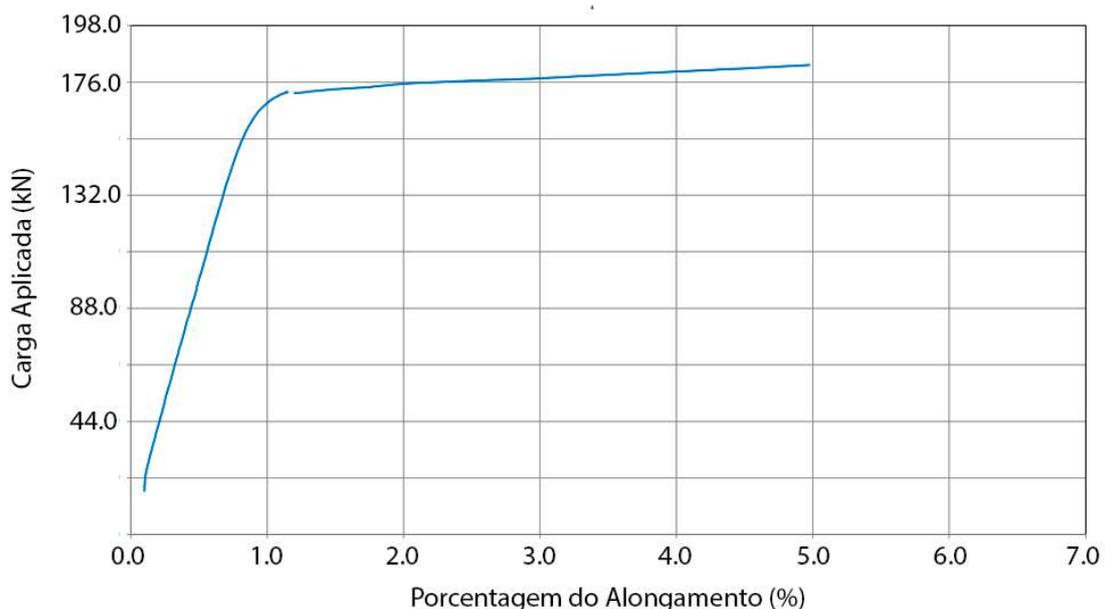


Figura 5 – Curva carga aplicada x porcentagem de alongamento (%) para conjunto de ancoragem EBPX 12,7 mm e cunha 7° - Amostra 03 e 04.

Tabela 3 – Resultado do teste de fadiga de acordo com a AC303 (2020)

Amostra	Conjunto	Ciclos de Carregamento	Carga Mínima (kN)	Carga Máxima (kN)	Aprovado/Reprovado
EBPX – 03-12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	500000	110,23	121,25	Aprovado
EBPX – 03-12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	50	73,48	156,15	Aprovado
EBPX – 04-12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	500000	110,23	121,25	Aprovado
EBPX – 04-12,7 mm	EBPX 12,7 mm e Cunha 7°	50	73,48	156,15	Aprovado

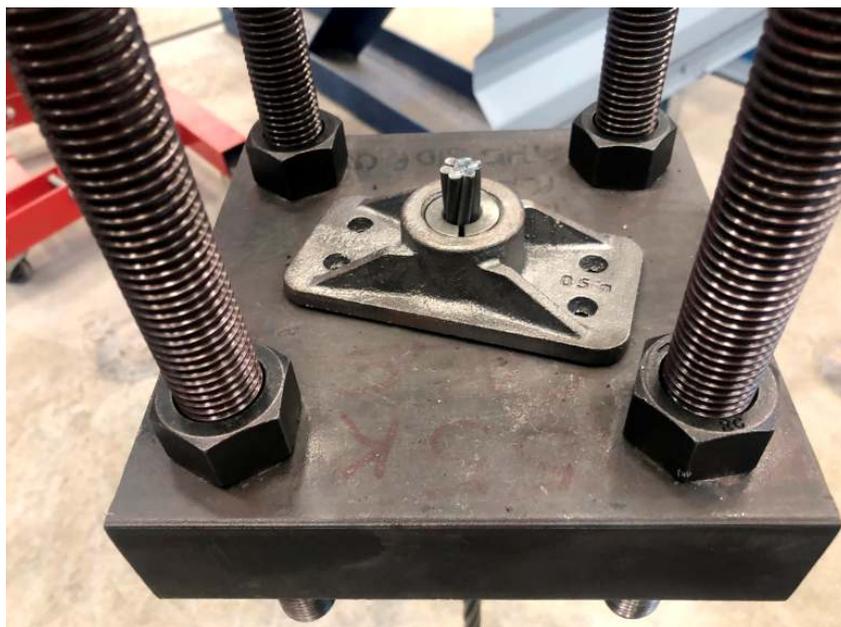


Figura 6 – Placa de ancoragem e cunha após o ensaio de fadiga

Conclusões

O concreto protendido em especial a modalidade com armadura ativa pós-tracionada sem aderência demonstrou ser uma tecnologia versátil com simplicidade de execução, o que fez com que fosse utilizada em diversos tipos de estruturas em todo o mundo. Não obstante houve a preocupação de diversas normativas com a segurança do sistema uma vez que não criada a aderência com o concreto a armadura ativa se conecta nos dispositivos de ancoragem que transferem a força de protensão para a estrutura. Portanto qualquer falha no dispositivo de ancoragem pode colocar em risco a integridade da estrutura, assim as normativas de acordo com a sua finalidade elaboraram tópicos relacionados ao tema devido a sua importância. A ACI 318-19 (2019) e a AASHTO LRFDCONS-4 (2020) possuem foco nas recomendações para projetos e construção de edifícios e pontes, respectivamente. No tocante a ACI 423.7 (2014) e a PTI M10.2-17 (2017) o enfoque encontra-se nas especificações dos dispositivos de ancoragem e pôr fim a AC303 (2020) que explora tanto as especificações quanto o ensaio dos dispositivos. A opção por detalhar os critérios de cada referência teve o intuito de ampliar o estudo sobre o tema e também constatar que alguns dispositivos de ancoragem podem ser aprovados e receber certificação de algumas normativas e de outras não, devido ao rigor apresentado por cada uma delas, no entanto pode-se constatar que a AC303 (2020) demonstrou ser a mais rigorosa de todas as normativas tanto para ensaios estáticos e de fadiga. Ainda sobre especificações fato de relevância foi citado pela ACI 423.7 (2014) e PTI M10.2-17 (2017) no tocante a não utilizar componentes de diferentes fabricantes sem realização dos testes necessários. A experiência do autor mostra que as tolerâncias no dispositivo de ancoragem representam um limiar tênue entre um conjunto ser aprovado e reprovado nos testes, até mesmo para o mesmo fabricante, que dirá de outros fabricantes. A

concepção, execução e ensaio de um dispositivo de ancoragem sem dúvida contou com etapas desafiadoras e minuciosas com relação a modelagem em elementos finitos e com relação a etapa de fundição principalmente por se tratar de um elemento de pequenas dimensões, mas com inúmeros detalhes específicos. Os resultados obtidos demonstraram aprovação em todos os quesitos da AC303 (2020), o que também aprova o dispositivo para as normativas ACI 423.7 (2014), PTI M10.2-17 (2017), ACI 318-19 (2019) e a AASHTO LRFDCONS-4 (2020). No Brasil sabe-se que o uso do concreto protendido com armadura ativa pós-tracionada sem aderência vem crescendo a cada ano, no entanto o país ainda não dispõe de uma normativa para ensaios dos dispositivos de ancoragem. De uma maneira geral esse fato coloca em alerta a utilização do sistema, de seus usuários e que na atual conjuntura gera relativo desconforto dado a magnitude das obras já executadas, no entanto o artigo teve como objetivo apontar para conscientização dos testes estáticos e de fadiga através do estudo de caso, potencializar a técnica no país e contribuir para produção de estruturas mais seguras e duradouras.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao Dr. Rodrigo Barbosa Thomaz pela sua solidariedade.

Referências

- AC303. Acceptance Criteria for Post-Tensioning Anchorages and Couplers of Prestressed Concrete, Jan. 2007, ICC-ES Evaluation Service, LLC, Whittier, CA. 2007.
- AMERICAN ASSOCIATION OF THE STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO LRFDCONS-4 – LRF Bridge Construction Specifications, Fourth Edition. 2020.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete. 2019.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 423.7-14 – Specification for Unbounded Single-Strand Tendon Materials. 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI PRC-215-21 – Concrete Structure Design for Fatigue Loading—Report. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A416/A416M – Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete. 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1077-17 – Standard Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6916 – Ferro Fundido Nodular ou Ferro Fundido com Grafita Esferoidal - Especificação. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7483 – Cordoalhas de Aço para Estruturas de Concreto Protendido – Especificação. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 2768-2 – Tolerâncias Gerais Parte 2: Tolerâncias Geométricas para Elementos sem Indicação de Tolerância Individual. 2001.
- CAUDURO, E. L. Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas. 2. ed. Belo Horizonte: Belgo Mineira, 2002.
- GAMBLE, W.L., An Experimental Investigation of the Strength and Behavior of a Prestressed Concrete Flat Plate, Report T80-9, Division of Building Research, Commonwealth (of Australia) Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, 1964.
- HEMAKOM, R., Behavior of Post-Tensioned Concrete Slabs with Unbonded Reinforcement, Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 1970.
- PTI Committee M-10. Specification for Unbonded Single Strand Tendons (PTI M10.2-17), Fourth Edition, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, MI, 34 pp, 2017.
- PTI Committee M-50. Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems (PTI M50.1-98), First Edition, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, MI, 53 pp, 1998.
- SCORDELIS, A.C., PISTER, K.S., LIN, T.Y. Strength of a Concrete Slab Prestressed in Two Directions, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 28 (Proceedings Vol. 53), n° 3, 241-256 pp, 1956.