



A importância da calda de cimento para injeção na protensão de pontes: Um estudo comparativo entre normativos nacionais e internacionais de controle de qualidade

Paulo André Valadares¹; Fabio Albino de Souza²

¹ Engenheiro Civil/ Pós-graduado / IDD

² Unicamp / IDD/ EBPX / Departamento de Estruturas – DES

Resumo

As normas técnicas apresentam como função padronizar medidas, processos executivos e processos de controle de qualidade. Sendo o seu uso no âmbito da engenharia cada vez mais necessário, tanto para padronizar processos de execução em projetos e obras, quanto para garantir segurança e confiabilidade a produtos. Desde o final do século XIX, quando se deu o primeiro registro intencional de utilização da protensão no concreto, estruturas em concreto protendido têm sido implementadas na construção civil em uma grande quantidade de obras, sendo amplamente utilizadas, destacando-se principalmente em pontes e viadutos. No entanto uma falha em uma ponte pós-tensionada no Reino Unido no ano de 1985, provocou uma revisão completa nos padrões e normas relativos a estruturas pós-tensionadas. Deste modo o trabalho proposto tem como objetivo estudar a temática da calda de cimento para injeção em pontes de estruturas de concreto protendido através de um estudo comparativo entre normatizações nacionais e internacionais, relativas ao seu controle de qualidade.

Palavras-chave: Calda de cimento; Concreto Protendido; Normatização.

Abstract

Technical standards have the function of standardizing measures, executive processes and quality control. Its use in engineering is increasingly necessary, both to standardize execution processes in projects and works, as well as to ensure product safety and reliability. Since the late nineteenth century, when the first intentional record of the use of prestressing concrete was made, prestressed concrete structures have been implemented in civil construction in a large number of works, being widely used in structures such as buildings, airport runways, water reservoirs, silos, among others, especially bridges and viaducts. However, a failure of a post-tensioned bridge in the United Kingdom in 1985, caused a complete overhaul of standards and norms related to post-tensioned structures. Thus the proposed work aims to study the theme of grout for injection in prestressed concrete structures through a comparative study of national and international standards related to its quality control.

Key-words: Grout for Injection; Prestressed Concrete; Standardization.

Introdução

Observa-se que atualmente a protensão em estruturas de concreto é uma técnica utilizada para construir uma considerável quantidade de pontes e viadutos de concreto, sendo ela caracterizada pelo emprego de elementos estruturais de concreto armado comprimidos por cordoalhas tensionadas. Sendo ainda capaz de proporcionar uma melhora na resistência da estrutura e em seu comportamento sob diversas condições de carga, viabilizando também, tecnicamente projetos com vãos maiores entre pilares (BUCHAIM, 2007).

Segundo Pfeil (1984) a protensão aplicada ao concreto consiste em introduzir esforços que limitem as tensões de tração no concreto, limitando assim a abertura de fissuras e a ocorrência de deformações. Carvalho (2012, p. 13) expõe que o objetivo do concreto protendido é diminuir a fissuração do concreto através da introdução de tensões normais de compressão em regiões onde devido a outras ações existam tensões de tração. De acordo com Cholfe e Bonilla (2015, p.2) o concreto protendido propicia um maior aproveitamento estrutural devido à entre outros motivos sua elevada capacidade de resistência, e por apresentar baixas deformações e melhores condições de durabilidade e uso.

Desde o final do século XIX quando se deu o primeiro registro intencional de utilização da protensão no concreto, as estruturas em concreto protendido têm sido implementadas na construção civil em uma grande quantidade de obras, sendo amplamente utilizadas, destacando-se principalmente em pontes e viadutos. Entretanto, Wymer e Poser (2009) destacam que após uma falha em uma ponte pós-tensionada no Reino Unido em 1985, foi preciso realizar uma revisão completa nos padrões e normas relacionados a estruturas pós-tensionadas

Dito isto e tendo em vista que o conjunto representativo de estruturas em concreto protendido é amplo, analisar a utilização e normatização deste tipo de estrutura passou a ser um assunto de importância. Sendo assim, o trabalho objetivou estudar a temática da calda de cimento para injeção, para protensão de pontes, através de um estudo descritivo de abordagem quanti-qualitativa e, por meio de uma pesquisa documental, uma análise comparativa entre normatizações nacionais e internacionais relativas ao controle de qualidade de

caldas de cimento para injeção utilizadas em estruturas de concreto protendido aplicáveis à construção de pontes.

Concreto Protendido

Segundo Pfeil (1980) a protensão aplicada ao concreto consiste em introduzir esforços que limitem as tensões de tração no concreto, limitando a abertura de fissuras e incidência de deformações. Conforme a norma brasileira ABNT NBR 6118/2014 define-se elementos de concreto protendido como sendo aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, limitar a fissuração e as deformações da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ELU).

Ressalta-se também que a protensão permite um melhor aproveitamento das qualidades dos materiais empregados, ao possibilitar a elevação da resistência à compressão do concreto e da resistência à tração dos cabos de aço (PFEIL, 1984). Segundo apontam Verissimo e Cesar Júnior (1998) a classificação de uma estrutura de concreto protendido está atrelada às características de seu projeto e construção. Podendo o concreto ser protendido por pré-tração ou pós-tração aderente ou não aderente. De modo que se utiliza a pós-tração especialmente em vigas de pontes, obras de arte e elementos de grandes dimensões.

De acordo com Segundo Pfeil (1984) a pós-tração aderente é realizada após o endurecimento do concreto, utilizando-se partes do próprio elemento estrutural como apoios. Bem como colocando-se as armaduras de protensão em bainhas, que, por sua vez, são posicionadas antes da concretagem da peça. Após a protensão das armaduras, as bainhas são preenchidas através da injeção de calda de cimento, conferindo assim a aderência das armaduras ao concreto.

Segundo publicado em catálogo da empresa Rudloff (2012) utilizar uma estrutura de concreto protendido significa fazer uso de uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura. Sendo esta tecnologia inteligente devido ao fato de utilizar o máximo da capacidade do aço e do concreto, gerando assim estruturas mais econômicas; eficaz devido à sua superioridade técnica sobre soluções convencionais que proporciona estruturas seguras e confortáveis e; duradoura, porque possibilita uma vida útil longa aos seus elementos.

Carvalho (2012) comenta que dentre as vantagens advindas da utilização da protensão encontram-se o controle e a redução de deformações e da fissuração, um ótimo custo benefício, a possibilidade de uso em ambientes agressivos e a possibilidade de aplicação em peças pré-fabricadas e na recuperação e reforço de estruturas. Sendo ainda apontado pelo autor que como resultado positivo da protensão, em muitos casos, suas estruturas têm uma baixa ou nenhuma necessidade de manutenção ao longo de sua vida útil.

Por outro lado, dentre as desvantagens que podem ser relacionadas encontram-se a demanda por uma mão de obra mais especializada, a necessidade de um maior controle de qualidade do concreto, a exigência de cuidados especiais de modo a prevenir corrosões nos aços de alta resistência e, uma colocação mais precisa dos cabos de protensão de modo a garantir as posições admitidas nos cálculos (CARVALHO, 2012).

Calda de cimento para injeção em estruturas de concreto protendido

De acordo com Verissimo e Cesar Júnior (1998) a calda de cimento para injeção constitui uma suspensão de cimento em água, com ou sem adjuvantes, que tem como função proporcionar a aderência posterior da armadura de protensão com o concreto e, a proteção da armadura ativa contra corrosão. Sendo assim um importante componente de todas as estruturas de concreto protendido com aderência posterior.

Conforme apontado por Cholfe e Bonilla (2015) em trabalhos de injeção a calda de cimento além de proteger a armadura, também transfere esforços entre cordoalha e concreto ao longo do elemento. Sendo ela inserida dentro de bainhas metálicas, que são posicionadas ao longo do elemento até seu total preenchimento.

Dentre seus objetivos principais estão o preenchimento completo do espaço existente entre a bainha e as armaduras de pré-esforço, de modo a proteger a armadura de corrosões. E o estabelecimento da aderência entre as armaduras de pré-esforço e a bainha e, conseqüentemente, com o concreto envolvente.

O estabelecimento da aderência proporciona uma distribuição mais uniforme de eventuais fissuras e melhora a resistência à rotura das peças submetidas à flexão, evitando assim flutuações de tensão do aço nas

ancoragens. Observa-se que com o enchimento de toda a bainha com calda o risco de congelamento da água aprisionada é evitado. Deste modo também, os cordões ou cabos de aço de pré-esforço alojados em bainhas no interior do concreto têm sua proteção assegurada, em parte pelo próprio concreto da peça e também pela injeção que deve encher totalmente as bainhas (HANAI, 2005).

Segundo Leonhardt (1983) para desempenharem convenientemente seu papel é necessário que a calda de injeção respeite certas condições e reúna algumas características específicas. Devendo assim em atenção à facilidade de colocação na obra, apresentar uma boa injectabilidade, com fluidez suficiente para facilmente penetrar nas bainhas e envolver as armaduras.

Em atenção à estabilidade da mistura espera-se por exemplo que não haja separação das duas fases e que a retração seja baixa (caso exista). Sendo a estabilidade da calda avaliada pela exsudação e pela variação de volume. Ademais, a calda deve ainda apresentar resistência mecânica adequada, de modo a assegurar a aderência entre as armaduras de pré-esforço e o cimento que envolve a bainha.

Ao abordar a fase de execução da injeção, Carvalho (2012) aponta que a aplicação da protensão, pode demandar uma maior complexidade na montagem das formas, sendo para tanto necessária uma mão de obra mais qualificada e a colocação de elementos específicos, como bainhas e cabos.

Destaca-se ainda que a injeção das bainhas de pré-esforço não é a única utilização das caldas de cimento, sendo múltiplas as suas aplicações. De modo que as mesmas podem ser utilizadas para a injeção de solos, de rochas, e de concreto deteriorados com grandes vazios entre outros (HANAI, 2005).

Normatizações sobre caldas de cimento para injeção em estruturas de concreto protendido

Por muitos anos poucos foram os registros ao redor do mundo de regulamentações específicas sobre caldas de cimento para injeção, principalmente no que diz respeito às suas características e aplicações. Neste sentido de acordo com o que apontam Wymer e Poser (2009) e Lemos et. al. (2014) observa-se que a natureza dos códigos e diretrizes para caldas de cimento é bastante específica e relacionada à localização geográfica e peculiaridades do mercado onde a obra acontece.

Conforme aponta Clark (2013) entre os anos de 1979 e 1992 o Comitê Permanente de Segurança Estrutural do Reino Unido (SCOSS) publicou relatórios anuais nos quais apresentavam suspeitas de deficiências no processo de protensão de algumas estruturas. Conseqüentemente, em 1992, tais suspeitas levaram o Departamento de Transporte do Reino Unido a proibir a prática da protensão em pontes. Tal proibição marcou o início de um processo que ao longo de 20 anos levou organismos nacionais e internacionais a realizarem diversas investigações e revisões em suas normas e procedimentos para que fossem estabelecidas mudanças e melhores condições e garantias de segurança e a confiabilidade em estruturas pós-tensionadas.

Segundo infere-se de Lemos et al. (2014) durante muito tempo a regulamentação nacional e internacional sobre caldas de cimento foi escassa. No entanto, atualmente é possível localizar uma considerável quantidade de documentos, que se apresenta mais pormenorizada, não apenas em relação aos seus constituintes, e sua qualidade e conformidade, como também em relação às suas características, e aos ensaios necessários para a sua caracterização e controle de qualidade.

Assim no presente estudo serão analisados aspectos relativos ao controle de qualidade das caldas de cimento para injeção, conforme disposto em 08 normatizações de concreto protendido aplicáveis à construção de pontes, sendo 02 brasileiras, 02 americanas, 03 europeias e 01 internacional, válida em múltiplos países, conforme exposto na tabela 1.

Tabela 1 - Normatizações sobre calda de cimento

NORMA	PAÍS	TÍTULO
AASHTO LRFD	EUA	AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications
ABNT NBR 7681:2013	BRASIL	Calda de cimento para injeção
DNIT 117/2009 - ES	BRASIL	Pontes e viadutos rodoviários – Concretos, argamassas e calda de cimento para injeção - Especificação de serviço
ISO 14824:2012	INTERNACIONAL	Grout for prestressing tendons
EN 445:2008	EUROPA	Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio.
EN 446:2008	EUROPA	Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Procedimentos de injeção.
EN 447:2008	EUROPA	Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Requisitos básicos.
PTI - M55.1:2012	EUA	Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures

Fonte: elaboração própria (2019).

As normas brasileiras analisadas foram a ABNT NBR 7681:2013, que estabelece os requisitos e respectivos métodos de ensaio para calda de cimento Portland a ser empregada no preenchimento de bainhas e dutos de armaduras de protensão de peças de concreto protendido. E a norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT 117/2009 – ES que define a sistemática empregada na execução e recebimento de concretos, argamassas e caldas de cimento para injeção em obras de construção de pontes e viadutos rodoviários de concreto armado e de concreto protendido.

A normatização americana analisada é composta pela AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications que traz o código geral de construção para pontes e outras estruturas de rodovias nos Estados Unidos, e foi elaborada pelo American Association of State Highway and Transportation Officials. E pela PTI - M55.1:2012 - Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures publicada pelo Post-Tensioning Institute (PTI) e que descreve especificações para injeção da calda de cimento em estruturas pós-tensionadas, incluindo pontes, estruturas de contenção e edifícios.

A norma internacional ISO 14824:2012 - Grout for prestressing tendons, fornece requisitos básicos para a aprovação e execução da injeção da calda de cimento em estruturas de concreto protendido pós-tensionadas. Sendo está

estabelecida pela Organização Internacional de Normalização (ISO), que congrega os grêmios de padronização/normalização de 162 países.

Foram analisadas ainda as normas europeias sobre caldas de injeção para armaduras de pré-esforço, EN 445:2008, EN 446:2008 e EN 447:2008, que estabelecem métodos de ensaios, procedimentos de injeção, e requisitos para as caldas de cimento. As mesmas foram elaboradas pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN), e devem ser implementadas por organismos nacionais de normalização de aproximadamente 30 países europeus, entre eles Alemanha, França, Itália, Portugal, Reino Unido e, Suíça. Sendo neste estudo utilizadas as versões portuguesas (NP EN 445, NP EN 446 e NP EN 447).

Sendo assim, cabe aqui ressaltar que apesar de todas as normatizações abordadas tratarem da temática da calda de cimento para injeção em estruturas de concreto protendido, ao realizar o comparativo entre as mesmas, não se pode ignorar que existem certos aspectos, que diferem entre os países onde as normas são aplicadas e, influenciam diretamente na execução das obras relacionadas, como por exemplo diferenças climáticas. Dito isto destaca-se ainda que as análises por este estudo realizadas não buscam definir e/ou considerar um cenário de parâmetros únicos e aplicáveis de modo igual em todos os países.

Análise comparativa entre normas nacionais e internacionais

De modo a iniciar as análises e considerando-se aspectos relacionados à caracterização das caldas e aos seus componentes bem como a existência de diferentes tipos de cimento, e suas distintas composições que fornecem ao concreto características variadas como as relativas a trabalhabilidade, durabilidade, e resistência, registra-se primeiramente que de modo geral, as normas estudadas indicam a utilização de cimento Portland para a composição de caldas de cimentos, conforme exposto na tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de cimentos indicados

Norma	Tipo de cimento indicado
Normas brasileiras	Portland CP I, CP I-S, CP V ARI, CP IV e CP II (com exceção do CP II-E), conforme exigido pelas normas ABNT NBR 5732, ABNT NBR 5733, ABNT NBR 5736 e ABNT NBR 11578
Normas americanas	Portland -Tipos I e II
ISO 14824	Cimento Portland ou qualquer outro tipo de cimento, que cumpra o padrão nacional do local de utilização da injeção
Normas europeias	Portland do tipo CEM I ou outro tipo que cumpra o padrão nacional do local de utilização da injeção

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

Observa-se também que todas as normas analisadas definem que a composição do cimento utilizado, deve admitir o teor máximo de cloro proveniente de cloretos como sendo $\leq 0,10\%$ e o teor máximo de enxofre proveniente de sulfetos como sendo $\leq 0,20\%$. Menciona-se ainda que para a escolha do cimento a ser utilizado deve-se considerar diferentes fatores, como por exemplo, a temperatura ambiente do local onde será construída a estrutura, e a possibilidade de exposição da mesma a ambientes desfavoráveis como meios agressivos sulfatados como redes de esgotos, ambientes industriais e água do mar.

Em atenção à água destinada ao preparo da calda, tem-se que todas as normas definem que a mesma deve ser de fabricação recente, limpa, potável, apresentar pH entre 5,8 e 8,0 e refrigerada a uma temperatura a partir de 4°C, e em temperatura ambiente máxima de 40°C no momento da aplicação. Quanto à relação água/cimento ou água/aglomerante, estas devem ser inferiores ou iguais a 0,45, e respeitando os seguintes limites máximos de matéria orgânica como sendo iguais a 3mg/l (oxigênio consumido); de resíduo sólido de 5000 mg/l; de sulfatos de 300 mg/l (íons SO₄); de cloretos de 500mg/l (íons Cl); e de açúcar de 500mg/l. Destaca-se que no Brasil a água utilizada deve obrigatoriamente obedecer os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15900-1, conforme exposto na tabela 3.

Tabela 3 - Características da água conforme a norma ABNT NBR 15900-1

Água - limites máximos	
Água - pH	entre 5,8 e 8
Matéria orgânica	3 mg/l
Resíduos sólidos	5000 mg/l
Sulfatos	300 mg/l
Cloretos	500 mg/l
Açúcar	5 mg/l

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

Quanto à utilização de aditivos tem-se que a definição do seu emprego (tipo, procedência e teor) deve ser precedida por ensaios em composições de calda com os cimentos disponíveis para aplicação, para a certificação de sua adequação e compatibilidade. O aditivo deve ser homogêneo, isento de cloretos e halogenetos, podendo ser líquido ou sólido.

Em atenção ao preparo da calda e à ordem usual para introdução dos materiais na misturadora (salvo indicação diferente do fabricante do aditivo), tem-se, de modo geral, que de acordo com as normas analisadas, que a mesma deve ser: 1º Água; 2º Aproximadamente 2/3 do cimento; 3º Aditivos e; 4º Restante do cimento.

Quanto à dosagem dos materiais, a mesma deve ocorrer no local da injeção. Em caso de caldas pré-doseadas os materiais secos podem ser doseados na fábrica e misturados com os materiais líquidos no local da injeção. Todas as normas aqui analisadas definem que os materiais devem ser doseados em massa, com exceção da água de amassadura e dos adjuvantes líquidos, que podem ser doseados em volume. Devendo a exatidão do doseamento, em relação à quantidade especificada, ser de $\pm 2\%$ para cimento, adjuvantes e adições secas, e $\pm 1\%$ para água e adjuvantes líquidos.

Em atenção ao chamado respiro de injeção destaca-se aqui que segundo o catálogo da empresa Rudloff (2012) no mesmo podem ser utilizados purgadores de diâmetro externo de 25mm e/ou 15mm. Bem como devem ser instalados tubos de respiro em pontos intermediários, sempre que a distância entre respiros for maior que 20mm ou quando recomendado pelo projetista.

Os respiros devem ser munidos de dispositivos de fechamento rápido (registro ou dispositivos de fechamento por dobramento ou estrangulamento) nas ligações com a bomba de injeção e em todos os respiros de saída. As tubulações dos respiros utilizados como purgadores, independente de seus

pontos de fixação na bainha e de saída externa na viga, devem ser dispostos de forma tal, que suas extremidades fiquem situadas acima do plano da face superior da viga.

Em atenção ao procedimento de injeção destaca-se que usualmente utiliza-se a pressão numa faixa entre 0,3 a 0,8 MPa, sendo a pressão de 0,5 Mpa a mais apropriada. Tem-se ainda que após o fechamento dos eventuais purgadores intermediários e, sucessivamente, do de saída, deve-se manter a calda com pressão de trabalho acrescida de 0,1MPa, por ao menos um minuto. Posteriormente, o respiro de injeção poderá então ser fechado, sem qualquer perda de nata na operação (RUDLOFF, 2012).

Considerando-se ainda os materiais e dispositivos necessários para o procedimento de protensão, tem-se segundo Basso (2018) que além do concreto e do aço também são necessárias armaduras passivas e dispositivos de protensão como bainhas metálicas, que variam entre 0,1mm e 0,35mm, calda de cimento, espaçadores, ancoragens ativas e passivas emendas, cunhas, nichos de ancoragem, e macaco hidráulico entre outros.

Sobre o controle de qualidade relativo à calda de injeção utilizada em estruturas de concreto protendido tem-se que o mesmo se dá pela realização de ensaios, que objetivam avaliar sua fluidez, exsudação, expansão, resistência à compressão e vida útil. Devendo seus resultados apresentarem índices adequados aos requisitos estabelecidos em normatizações específicas. Cabe aqui mencionar que existem diferentes tipos de métodos de ensaios para cada uma das propriedades analisadas e para demonstrar este fato, apresenta-se a seguir a tabela 4 que elenca os principais métodos identificados nas normas aqui estudadas.

Tabela 4 – Principais métodos de ensaio identificados nas normas analisadas

Propriedade	Método de ensaio
Fluidez	Método do cone
	Método de espalhamento
Exsudação	Induzida pela mecha
	Tubo inclinado
Expansão - Variação de volume	Induzida pela mecha
Resistência à compressão	Metades partidas dos prismas

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

Analisando-se então o requisito relativo ao índice de fluidez, tem-se que de acordo com Nova (2017) a fluidez da calda depende da natureza e da finura do cimento, bem como do teor de água, e das adições eventuais, como os aditivos químicos. Considerando-se o método de ensaio do cone são estabelecidos os limites admitidos para o tempo, em segundos(s), que 1.000cm³ de calda leva para escoar por um funil de Marsh. De modo que os valores máximos admitidos variam entre 12 e 30 segundos, e os valores mínimos são fixados entre 5 e 11 segundos, conforme exposto na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Índices de fluidez de referência.

Norma	Índice de Fluidez - valores limite	
	Imediatamente antes da injeção	Na saída da bacia
ABNT NBR 7681-2	≤ 12 segundos	≥ 8 segundos
AASHTO LRFD	≤ 30 segundos	≥ 11 segundos
DNIT 117/2009 - ES	≤ 18 segundos	≥ 8 segundos
ISO 14824:2012	≤ 25 segundos	≥ 10 segundos
NP EN 447	≤ 25 segundos	≥ 10 segundos
PTI - M55.1	≤ 30 segundos	≥ 5 segundos

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

As normas com maiores limites máximos imediatamente antes da injeção, fixados em 30 segundos por ambas, foram a AASHTO LRFD e a PTI-M55.1. Quanto ao limite mínimo na saída da bacia, o mesmo foi estabelecido pela norma PTI-M55.1. Ressaltando-se que entre determinações sucessivas do índice de fluidez, o recipiente deve permanecer tampado e a calda mantida em repouso, devendo ser homogeneizada imediatamente antes da realização do ensaio. Tem-se ainda que conforme a norma ABNT NBR NM ISO 3310-1, no ensaio deve ser utilizada peneira com abertura de malha de 2,36mm.

De acordo com o exposto por Carvalho (2012) recomenda-se que a consistência da calda seja a máxima compatível com a injectabilidade. Nota-se ainda que ao aumentar a fluidez, aumentam-se também os seguintes fenômenos:

- Exsudação da água, com perigo de corrosão das armaduras e do seu eventual congelamento.
- Diminuição de volume de pasta de cimento, com perigo de corrosão nos pontos altos do traçado dos cabos.
- Diminuição da resistência, com perigo para a aderência.
- Maior penetrabilidade da calda.

- Menor probabilidade de entupimento da injeção com a formação de tampões.

Em atenção ao requisito de vida útil da calda de cimento, observa-se que os valores normatizados, apresentados na tabela 6, estabelecem a mesma por meio de índices de fluidez que variam entre 12 e 30 segundos, durante o período de 30 minutos, após a conclusão da mistura. Sendo observado que a norma ABNT NBR 7681-2 estabelece o índice mais baixo e as normas AASHTO LRFD e PTI - M55.1 os mais altos.

Tabela 6 - Vida útil da calda durante 30 minutos após a conclusão da mistura

Norma	Vida útil - limite mínimo de Índice de fluidez admitido durante o período de 30 minutos, após a conclusão da mistura.
ABNT NBR 7681-2	≤ 12 segundos
AASHTO LRFD	≤ 30 segundos
DNIT 117/2009 - ES	≤ 25 segundos
ISO 14824:2012	≤ 25 segundos
NP EN 445	≤ 25 segundos
PTI - M55.1	≤ 30 segundos

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

Em atenção ao requisito de exsudação, as normas apontam que a água exsudada admitida deve apresentar valor máximo entre 0% e 2% do volume inicial da calda, medida por 2h ou 3h após a mistura, conforme apresentado na tabela 7. Este ensaio consiste em medir a quantidade de água que reflui à superfície de uma calda que foi deixada em repouso, tendo sido impedida qualquer evaporação. A exsudação das caldas deve ser suficientemente baixa para evitar a segregação e a sedimentação dos materiais (MOREIRA, 2003).

Tabela 7 - Valores indicados para Exsudação

Norma	Exsudação - Valores máximos de água exsudada em relação ao volume inicial da calda	Tempo de medição após a mistura
ABNT NBR 7681-3	≤ 2% do volume inicial da calda	por 2h
AASHTO LRFD	≤ 0% do volume inicial da calda	por 3h
DNIT 117/2009 - ES	≤ 2% do volume inicial da calda	por 3h
ISO 14824:2012	≤ 0,3% do volume inicial da calda	por 3h
NP EN 447	≤ 0,3% do volume inicial da calda	por 3h
PTI - M55.1	≤ 0,0% do volume inicial da calda	por 3h

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

De acordo com os normativos estudados as caldas até serem injetadas devem ser mantidas em constante agitação para que não sofram processos de segregação e sedimentação, mantendo-se assim homogêneas e apresentando características uniformes. Uma forma de evitar este fenômeno é reduzir ao máximo o tempo que separam as etapas de preparação e injeção das caldas de cimento (MOREIRA, 2003).

Em relação ao requisito de expansão, as normas analisadas indicam conforme exposto na tabela 8, que a água exsudada deve apresentar valor máximo entre -1% e 7 % do volume inicial da calda, medida por 2h ou 3h após a mistura. Ressaltando-se que as normas ISO 14824, EN 445 e PTI – M55.1 não indicam tempos para medição.

Tabela 8 - Expansão, em relação ao volume inicial da calda.

Norma	Expansão	Tempo de medição
ABNT NBR 7681-3	≤ 7%	por 2 h após a mistura
AASHTO LRFD	≤ 2%	por 3 h após a mistura
DNIT 117/2009 - ES	≤ 7%	por 3 h após a mistura
ISO 14824:2012	(-) 1% (retração) + 5% (expansão)	-
NP EN 447	(-) 1% (retração) + 5% (expansão)	-
PTI - M55.1	≤ 2% (máximo)	-

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

Por seguinte observa-se o requisito relacionado à resistência à compressão, que é expressa pela média aritmética das resistências individuais dos seis corpos de prova. As resistências individuais que se afastarem dessa média mais de 15% são eliminadas, calculando-se uma nova média com os valores remanescentes. O resultado final é expresso em Megapascal (MPa), com três algarismos significativos.

Assim menciona-se que os ensaios relativos à resistência a compressão definem que a calda deve apresentar resistência à compressão axial superior ou igual, entre 25 MPa e 35 MPa, aos 28 dias de idade, de acordo com o apresentado na tabela 9. E entre 21 MPa e 27 MPa aos 07 dias de idade. Sendo a especificação do DNIT 117/2009 – ES o menor índice de resistência à compressão aos 28 dias. Observa-se ainda que as normas brasileiras analisadas, não estabelecem valores de referência para medição da resistência à compressão aos 7 dias de idade.

Tabela 9 - Resistência à compressão

Norma	Resistência - A calda deve apresentar resistência à compressão axial superior ou igual	
	Aos 28 dias de idade	Aos 7 dias de idade
ABNT NBR 7681-4	$F_{cm} \geq 35 \text{ MPa}$	-
AASHTO LRFD	$F_{cm} \geq 35 \text{ MPa}$	$F_{cm} \geq 21 \text{ MPa}$
DNIT 117/2009 - ES	$F_{cm} \geq 25 \text{ MPa}$	-
ISO 14824:2012	$F_{cm} \geq 30 \text{ MPa}$	$F_{cm} \geq 27 \text{ MPa}$
NP EN 445	$F_{cm} \geq 30 \text{ MPa}$	$F_{cm} \geq 27 \text{ MPa}$
PTI - M55.1	$F_{cm} \geq 35 \text{ MPa}$	$F_{cm} \geq 21 \text{ MPa}$

Fonte: elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2019).

Com relação à inspeção dos materiais, esta deve ser efetuada com antecedência, de forma a assegurar que eles atendam aos requisitos estabelecidos. Devendo elas ocorrerem nos locais de amostragem e nas frequências estabelecidas pela norma NBR 7881, conforme exposto na tabela 10.

Tabela 10 - Local de amostragem e frequência das inspeções

Ensaio	Local de amostragem			Frequência
	Recipiente da estocagem	Entrada da bainha	Saída da bainha	
Fluidez	—	Sim	—	Uma vez em cada cabo
	—	—	Sim	Quantas vezes necessário em cada cabo
Vida útil	Sim	—	—	Uma vez no início do primeiro dia de trabalho, repetindo-se no máximo a cada 100 sacos de cimento consumidos por frente de trabalho e/ou a cada semana; e cada vez que mudar a composição e/ou condições de mistura e/ou materiais
Exsudação	Sim	—	—	
Expansão	Sim	—	—	
Resistência à compressão	Sim	—	—	

Fonte: ABNT NBR 7681-1 (2013).

Por fim menciona-se que todos os documentos estudados apontam que os ensaios devem ser rigorosamente registrados através do relatório de ensaio. Devendo todos, além dos dados relativos à propriedade verificada, conter no mínimo as seguintes informações: identificação da obra; local de aplicação e tipo do elemento estrutural; data e hora; responsável pelo ensaio; marca e tipo do cimento, aditivo, adição e procedência da água; traço em massa, com indicação

da relação água/cimento ou água/aglomerante; tipo de misturador e; temperaturas (do ambiente, da água, dos aglomerantes e da calda).

Considerações Finais

Ao final da análise comparativa realizada entre as normas ABNT NBR 7681, DNIT 117/2009, ISO 12824, NP EN 445, NP EN 446, NP EN 447, AASHTO LRFD e PTI-M55.1 foi possível verificar que de modo geral os documentos apresentam significativa concordância entre si. Havendo assim bastante similaridades em seus valores de referência. Sendo observado que as normas europeias e a norma internacional ISO 12824:2012 utilizam valores de referência exatamente iguais. Bem como as normas americanas AASHTO LRFD e PTI - M55.1, convergem, e também apresentam valores de referência idênticos.

Em atenção às normas brasileiras tem-se que em médias as mesmas foram as normatizações que apresentaram menor rigurosidade. Destacando-se uma variação negativa na norma DNIT 117/2009, que se encontra bastante desatualizada, e que exige um índice de resistência à compressão considerado baixo, sendo este $F_{cm} \geq 25$ MPa aos 28 dias. Ressalta-se ainda que devido a altos índices de corrosão nas cordoalhas, deve-se sempre após a protensão final realizar-se a injeção de calda de cimento.

Deve ser observado também que tendo em vista as diversas opções de métodos construtivos possíveis de serem adotados, pode ocorrer uma pequena variação de tempo para execução do procedimento de injeção, de modo que se faz imprescindível manter um diálogo diário com cada projetista, afim de melhor controlar e executar o processo de protensão. Por fim menciona-se a necessidade de atualização de padrões estabelecidos pela norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, recomendando-se ainda a adoção de valores mais rigorosos.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7681-1: **Calda de cimento para injeção - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 7681-2: **Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 7681-3: **Calda de cimento para injeção - Parte 3: Determinação dos índices de exsudação e expansão — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 7681-4: **Calda de cimento para injeção parte 4: Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 15900-1: **Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM ISO 3310-1: **Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1 – Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

AASHTO, AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications**. 7. ed. Washington/DC: AASHTO, 2014.

BASSO, F. **Estudo de pontes com vigas I segmentadas pré-fabricadas de concreto protendido, utilizando o sistema de pré-tração e pós-tração**. 195 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2018.

BUCHAIM, ROBERTO. **Concreto protendido: tração axial, flexão simples e força cortante**. 1º Edição, Ed. EDUEL, Londrina, 2007.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 117/2009 – ES – Pontes e viadutos rodoviários – Concretos, argamassas e calda de cimento para injeção - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

CARVALHO, R. C. **Estrutura em Concreto Protendido: Cálculo e Detalhamento**. 1. ed. São Paulo: PINI, v.1, 2012.

CEN, Comité Europeu de Normalização. NP EN 445, Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Norma portuguesa. 2008.

CEN, Comité Europeu de Normalização. NP EN 447, Caldas de Injeção para armaduras de pré-esforço. Especificações para caldas correntes. Norma portuguesa. 2008.

CEN, Comité Europeu de Normalização. NP EN 446 – Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Procedimentos para injeção. Norma portuguesa. 2008.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. **Concreto protendido: Teoria e prática**. São Paulo: Pini, 2015.

CLARK, G. M. Post-Tensioned Structures–Improved Standards Based on Lessons Learnt. In: **Fédération Internationale Du Béton (fib) conference, Chennai**. 2013.

HANAI, J. B. **Fundamentos do concreto protendido**. E-book de apoio para o Curso de Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14824-1, Grout for prestressing tendons — Part 1: Basic requirements**. Geneva, Switzerland, 2012.

_____. International Organization for Standardization. **ISO 14824-2, Grout for prestressing tendons — Part 2: Grouting procedures**. Geneva, Switzerland, 2012.

_____. International Organization for Standardization. **ISO 14824-3, Grout for prestressing tendons — Part 3: Test methods**. Geneva, Switzerland, 2012.

Lemos, C. & J., Pereira & J., Lourenço & Júlio, Eduardo. Caldas de Cimento. Aplicações, Composição e Caracterização. **Construção Magazine**, 2014.

LEONHARDT, F. **Construção de Concreto: Concreto Protendido**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 5, 1983.

MOREIRA, Alberto M. V. T. **Estudos sobre Caldas de Injeção das Bainhas de Pré-Esforço**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. Porto, Portugal, 2003.

NOVA, Sílvia Juliana Sarmiento; DA SILVA, Maria Cecília Amorim Teixeira. AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE PONTES EM CONCRETO PROTENDIDO SOB SOLICITAÇÕES NORMAIS. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 2, 2017.

PFEIL, W. **Concreto Protendido, 1: Introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 1984.

PFEIL, W. **Concreto Protendido: Processos construtivos, perdas de protensão, sistemas estruturais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1980.

PTI, Post-Tensioning Institute. **PTI M55.1-Specification for grouting of post-tensioned structures**, 3rd edition, 2012.

RUDLOFF INDUSTRIAL LTDA. Concreto Protendido. São Paulo: Rudloff, 2012. Disponível em http://www.rudloff.com.br/downloads/catalogos/catalogo_concreto_protendido-site.pdf>.

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JR, K. M. L. **Concreto Protendido**: Perdas de Protensão. Notas de Aula na disciplina de Concreto Protendido do curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. 4. ed. Viçosa, 1998. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/amacinrm/protendido/arquivos/CP2.pdf>>.

WYMER, Paul; POSER, Marcel. State of the art grouting for post-tensioned structures. In: **AUSTROADS BRIDGE CONFERENCE, 7TH, 2009, AUCKLAND, NEW ZEALAND**. 2009.